



EESTI MAAÜLIKOOL

Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Jakob Goroško**

**KOMPOSIITSE PUIDUST JA BETOONIST  
SEINAELEMENDI „TIMBET“ KANDEVÕIME KATSELINE  
MÄÄRAMINE**

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF BEARING  
CAPACITY OF COMPOSITE TIMBER AND CONCRETE  
WALL ELEMENT „TIMBET“**

Ehitusinseneriõppe lõputöö  
Maaehituse õppekava

Juhendajad: Dotsent Jaak Valgur  
Lektor Vello Pallav

Tartu 2017

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Jakob Goroško		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Komposiitse puidust ja betoonist seinaelemendi „TimBet“ kandevõime katseline määramine			
Lehekülgi: 77	Jooniseid: 21	Tabeleid: 18	Lisaid: 13
Osakond:		Maaehitus	
Uurimisvaldkond:		Puit-betoon komposiitkonstruktsioonid	
Juhendajad:		Jaak Valgur, Vello Pallav	
Kaitsmiskoht ja aasta:		Tartu 2017	
<p>Tänapäeva ehituses on väga tähtis konstruktsioonide ökonoomsus ja vastupidavus. See annab puit-betoon komposiitlementide kasutamisele eelise puit- ja kivimaja ees. Sellel põhjusel on viimasel paarikümnel aastal suurenenud komposiitlementide tootmine.</p> <p>Magistritöö eesmärgiks on määrata puit-betoon seinapaneelide kandevõime ja võrrelda neid arvutuse teel saadud tulemustega. Täpsemate lähteandmete saamiseks komposiitpaneeli arvutamiseks tehti eraldi katsed puit-metall sõrestikpostidega. Selleks katsetati Posi-talasi paindele, et saada parem ülevaade nende paindejäikusest.</p> <p>Puit-betoon seinapaneelide katsed tehti 9 paneeliga, millest 3 paneeli betoonplaat oli kiudarmeeritud, 3 katsekeha oli armeeritud 6 mm armatuurvõrguga ja 3 paneeli – 8 mm armatuurvõrguga. Üks 6 mm armatuurvõrguga paneel katsetati ilma puit-metall sõrestikuta. Kasutatavates seinapaneelides on kandvaks osaks betoonplaat.</p> <p>Antud magistritöö tulemusena määrati puit-betoon seinaelementide kandevõime ja Posi-talade paindejäikus. Tulemustest selgus, et paneelide läbipaindeid mõjutas puit-metall betoonplaadi ja sõrestiku koostöö. Katsekeha, millel puit-metall sõrestik puudus oli läbipaine sama koormuse juures 4,8 korda suurem. Seinapaneelide läbipainete võrdlus samadel koormustel näitas, et paneelide läbipaine võis paneeliti erineda kuni kaks korda.</p>			
Märksõnad: puit-betoon komposiitkonstruktsioon, puit-metall sõrestikpost, Posi-tala.			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master’s Thesis	
Author: Jakob Goroško		Speciality: Rural Engineering	
Title: Experimental determination of bearing capacity of composite timber and concrete wall element „TimBet"			
Pages: 77	Figures: 21	Tables: 18	Appendixes: 13
Department:		Rural Engineering	
Field of research:		Composite timber and concrete element	
Supervisors:		Jaak Valgur, Vello Pallav	
Place and date:		Tartu 2017	
<p>In today’s construction industry it is important that structures are economical and durable. This gives an advantage to the use of timber-concrete elements compared with wood and stone building. In that event, the production of composite elements has increased in the past decades.</p> <p>This Master’s thesis aims to determine the load capacity of timber-concrete wall elements and compares them with theoretical calculations. Extra experiments were conducted to receive better calculation results with timber-metal lattice girders. Posi-Joist beams were tested for bending strength.</p> <p>In the tests of the timber-concrete wall elements 9 specimens were used, three of which were poured with fiber-reinforced concrete and reinforcement steel bars were used in the other 6 elements 3 were with a diameter of 6 mm and last 3 were of 8 mm. One of the samples with a 6 mm thick steel bar was tested without lattice girders.</p> <p>As a result of this Master’s thesis timber-concrete wall elements’ loading capacity and the bending stiffness of timber-metal lattice girders were obtained. The results showed that the lattice girder frame had a major impact on the wall element. The test specimen that did not have a lattice girder frame had 4.8 times bigger sag than the timber-composite wall element. A comparison of wall element bending results, at similar loading combinations, showed that the sag on two different panels could vary 2 times.</p>			
Keywords: timber-concrete composite structure, timber-metal composite beam, Posi-Joist.			

## Sisukord

SISSEJUHATUS .....	6
1 ÜLEVAADE PUIT-BETOON ELEMENTIDEST .....	8
1.1 Sarnased uurimistööd .....	8
1.2 Puit-betoon komposiit-seinaelement .....	11
1.3 Ajalugu .....	12
1.4 Seinaelementi tootmine .....	13
1.5 Puit-betoon seinaelementide eelised ja puudused .....	15
1.6 Komposiitelementide vahelised nihkeankrud .....	17
2 KATSEKEHADE JA KATSETE KIRJELDUS .....	18
2.1 Katsekehades kasutatud materjalid .....	18
2.1.1 Raudbetoon .....	18
2.1.2 Puit .....	19
2.1.3 Ogaplaadid .....	19
2.2 Katsete meetodika ja katsekehade kirjeldus .....	21
2.2.1 Betooni survetugevuse määramine .....	21
2.2.2 Posi-talade paindekatse .....	23
2.2.3 Puit-betoon seinapaneelid .....	26
3 KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS .....	30
3.1 Betooni survetugevuse kontrolli tulemused ja analüüs .....	30
3.2 Puit-metall sõrestikpostide paindekandevõime .....	31
3.3 Seinapaneelide kandevõime määramine .....	33
4 KATSETUSTEST JA TEOREETILISTEST ARVUTUSTEST SAADUD TULEMUSTE VÕRDLUS JA ANALÜÜS .....	38
4.1 Posi postide katsetulemustest ja teoreetilistest arvutustest määratud tulemuste võrdlus ja analüüs .....	38
4.2 Puit-betoon komposiitelementide katsetulemuste ja teoreetiliste arvutustega saadud tulemuste võrdlus ja analüüs .....	40
4.2.1 Puit-betoon seinapaneelide läbipaine .....	40
4.2.2 Puit-betoon seinapaneelide kandevõime .....	41
KOKKUVÕTE .....	43
KASUTATUD KIRJANDUS .....	46
EXPERIMENTAL DETERMINATION OF LOAD BEARING CAPACITY OF COMPOSITE TIBMER AND CONCRETE WALL ELEMENT „Timbet” .....	48
LISAD .....	50
Lisa 1. Betoonikihi paksuse mõõtmistulemused ja ogaplaatide asukohad .....	51
Lisa 2. Katsekehade mõõtmise tulemused .....	52
Lisa 3. Ajutine konstruktsioon siirdeandurite paigaldamiseks .....	53
Lisa 4. Betoonist kuubikujuliste katsekehade purunemispildid .....	54
Lisa 5. Puit-metall sõrestikpostide purunemiskohad .....	55
Lisa 6. Puit-metallsõrestike purunemispildid .....	57
Lisa 7. Puit-betoon komposiitpaneelide purunemiskohad .....	59
Lisa 8. Puit-betoon komposiitpaneelide purunemispildid .....	64
Lisa 9. Katsekehade koormamine ja läbipaine ajas .....	67
Lisa 10. Puit-metall sõrestikposti teoreetilise läbipaine arvutus .....	70

Lisa 11. Taricad arvutusskeem ja epüürid Posi-talale .....	72
Lisa 12. Taricad arvutusskeem ja epüürid puit-betoon komposiitpaneelile .....	74
Lisa 13. Komposiitpaneeli purustava põikkoormuse arvutamine .....	76

## SISSEJUHATUS

Betoon on tänapäeval üks kasutatumaid ehitusmaterjale. Betooni iseloomustab tema suur omakaal ja võrreldes survetugevusega on betooni tõmbetugevus väike. Selle tõttu on tänapäeval hakatud ehitamisel kasutama komposiitkonstruktsioone, kus kasutatakse ära betooni suurt survetugevust ja tõmbetooni paigaldatakse materjal, mis võtab hästi vastu tõmbepingeid. Raudbetoon, kui tuntum komposiitmaterjal hõivanud ehitusvaldkonnas olulise koha, kuid tänapäeva säästu, kvaliteedi ja ehituskestvuse nõudmised seavad uusi ülesandeid. Ühe alternatiivse lahendusena on hakatud koos kasutama raudbetooni ja puitu komposiitkonstruktsioonides, kus proovitakse kasutada mõlema materjali omadusi võimalikult efektiivselt. Tänapäeval on kõige suuremat kasutust leidnud sellised konstruktsioonid põrandate ja sildade ehituses kuid on ka hakatud otsima võimalusi, seinapaneelide valmistamisel, et saada kergemaid aga samas tugevamaid konstruktsioone.

Üheks selliseks firmaks, kes tegeleb puit-betoon seinapaneelide tootmisega Eestis on Alusehitus OÜ. Nende poolt toodetavates TimBet seinapaneelides on ühendatud betoonplaat ja puit-metall sõrestikpostid. Seinapaneelide soojustamiseks kasutatakse PUR vahtu. Seinapaneelide juures annab paneelile tugevuse betoon ja selleks, et anda konstruktsioonile lisajäikust ühendatakse betoonplaat puit-metall sõrestikpostidest raamiga, mis on oluliselt väiksema omakaaluga, kui betoon.

Puit-betoon komposiitpaneelides kasutatakse ära puidu ja betooni paremad omadused. Selle tulemusena saab konstruktsiooni, mis omab mitmeid eelised puitkonstruktsioonide ees. Seinapaneelid on tugevamad ja jäigemad, parema tulepüsivusega, hea helikindlus ja korralikult eelviimistletud pindadega paneelid, millesse on kerge paigaldada kommunikatsioone. TimBet seinapaneelide puudusteks on tootmise keerukus ja kõrge omahind, mille peaks kompenseerima ehitusplatsil paigaldamise kiirus ja kõrge kvaliteet.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on määrata Alusehitus OÜ poolt toodetavate puit-betoon seinapaneelide kandevõime, võrrelda omavahel erinevate armeeringutega seinapaneelide kandevõimeid ja arvutustulemusi. Magistritöös kasutatavates seinapaneelides on kandvaks osaks betoonplaat. Arvutuste sooritamiseks vajalike lähteandmete hankimiseks tehti lisaks paindekatsed, et määrata komposiit-seinapaneelis kasutatavate puit-metall sõrestikpostide

paindejäikus, ja survekatsed kuubikujuliste katsekehadega betooni survetugevuse määramiseks.

Magistritöö esimeses peatükis on antud ülevaade kirjandusest, kus on tutvustatud eelnevalt tehtud sarnaseid uurimistöid nii Eestis, kui ka välismaal. Kirjanduse põhjal on antud ülevaade ajaloost, tutvustatud komposiitpaneele ja toodud välja nende eelised ning puudused. Töös on antud ülevaade seinapaneelide tootmisest ja välja toodud sagedamini kasutatavad nihkeühendused.

Teises peatükis esitatakse kasutatud katsekehade ja kasutatud konstruktsioonide mõõtmed ning konstruktsioonilised lahendused. Töös on katsetatud betooni kuubikujulisi katsekehi, puit-metall sõrestikposte ja puit-betoon seinapaneele. Antud on ülevaade katsete metoodikast, kasutatud materjalidest ja katseseadmetest.

Kolmandas peatükis on välja toodud katsetest saadud tulemused ja nende analüüs.

Neljandas peatükis on välja toodud teoreetiliste arvutuste tulemused ja võrreldud neid katse tulemustega.

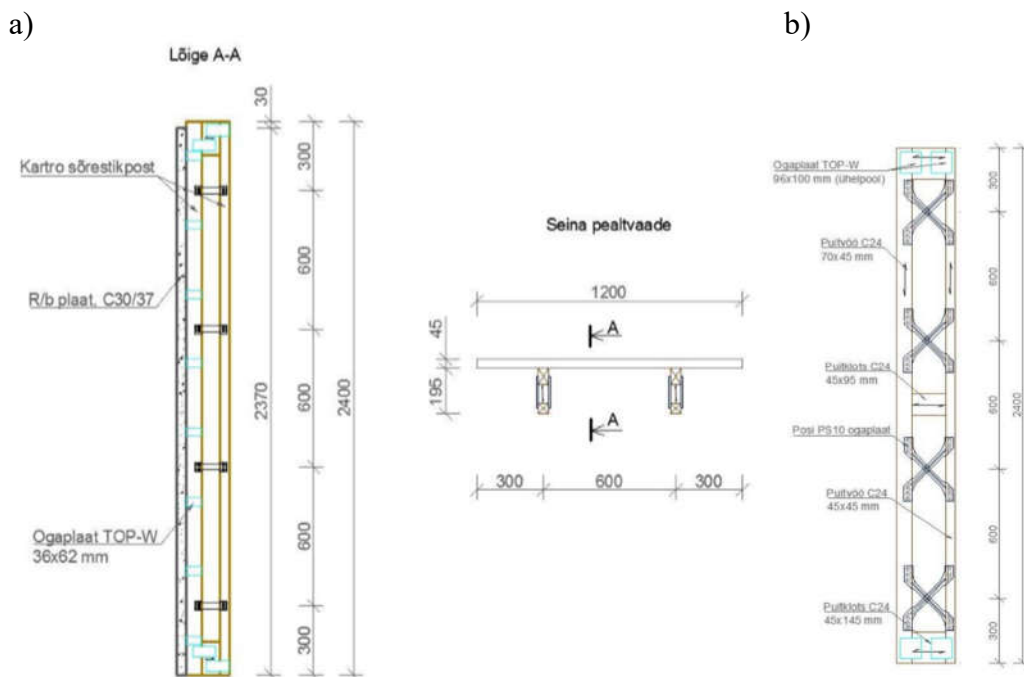
Antud magistritöös on viitamiseks ja kasutatud kirjanduse koostamiseks kasutatud rahvusvaheliselt tunnustatud süsteemi APA kuuendat väljalaset.

Autor soovib tänada magistritöö valmimisele kaasa aidanud juhendajaid Vello Pallavit ja Jaak Valgurit. Samuti kõiki teisi, kes aitasid lõputöö valmimisele kaasa ja Alusehitus OÜ-d katsekehade valmistamise eest.

# 1 ÜLEVAADE PUIT-BETOON ELEMENTIDEST

## 1.1 Sarnased uurimistööd

Eesti Maaülikoolis käsitles Peep Pihlapson 2015. aastal teemat „Puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide katsetused ja analüüs“ (Pihlapson, 2015). Töös rakendati koormus puit-betoon komposiitpaneelidele sõrestikpostide kaudu, uuriti puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit-seinapaneelide survekandevõimet ning sõrestikpostide ogaplaatide nihkekandevõimet. Töös kasutatud katsekehad on näidatud joonisel 1.1, mille sõrestikpostide puitvööde mõõdud olid 70×45 mm ja 45×45 mm.



**Joonis 1.1.** Katsekehade joonised a) Kartro puit-betoon komposiitpaneel b) Posi sõrestikpost (Pihlapson, 2015)

Lõputöös võrreldi saadud tulemusi omavahel ja teoreetiliste arvutustega ning arvutiprogrammist saaduga. Koormuste võrdluses selgus, et Posi sõrestikpostid suutsid vastu võtta märgatavalt suuremaid koormusi, kui kartro sõrestikpostid ja komposiitpaneelid, mis



oli tingitud Posi sõrestikpostide ristlõike suuremast mõõdust posti nõtkunud külje suunas. Sooritatud katsekehade nõtkekatsete tulemused on toodud tabelis 1.1.

**Tabel 1.1.** Sõrestikpostide ja puit-betoon komposiitpaneelide nõtkekatsete tulemused

Katsekeha	Maksimaalne koormus, kN	Purunemiskoht
Kartro 1	90,22	Kartro ogaplaatide välja nõtkumine
Kartro 2	88,85	Sõrestikposti 45 × 45 mm vöö lõhestus oksa kohalt
Kartro 3	65,75	Sõrestikposti 70 × 45 mm vöö lõhestus keskelt ja toimus Kartro ogaplaatide välja nõtkumine
Posi 1	138,72	Sõrestikposti 70 × 45 mm vöö puit purunes
Posi 2	118,97	Sõrestikposti 70 × 45 mm vöö puit purunes oksa kohalt
Posi 3	95,53	Sõrestikposti 70 × 45 mm vöö purunes oksa kohalt
Paneel 1	206,24	Alumise vöö juures purunes 70 × 45 mm puidust vöö ja alumised ogaplaadid tulid 45 × 45 mm vöö küljest lahti
Paneel 2	196,42	Betoonplaati tekkisid praod sõrestikpostide välja nõtkumise tõttu betoonplaadi suunas ja ogaplaadid tulid lahti alumise toe juurest 45 × 45 mm vöö küljest
Paneel 3	173,46	Betoonplaati tekkisid praod sõrestikpostide välja nõtkumise tõttu betoonplaadi suunas ja ogaplaadid tulid lahti alumise toe juurest 45 × 45 mm vöö küljest

Raudbetoonplaadi lisamine Kartro sõrestikpostidele suurendas seinakonstruktsiooni kandevõimet ~1,2 korda. Sõrestikpostide ogaplaatide nihketugevuse katsetest selgus, et Posi sõrestikpostide nihketugevused on ligi 2 korda suuremad, kui Kartro sõrestikpostidel. (Pihlapson, 2015)

Eesti Maaülikoolis tegi Marko Otsus 2013. aastal lõputöö teemal „Posi-talade ja puit-betoon komposiitpaneelide katsetused ja analüüs“ (Otsus, 2013), mille eesmärgiks oli uurida puit-betoon komposiitpaneelide paindekandevõimet ning deformatsioone, võrrelda sama koormuse juures deformatsioone Posi-talaga ja anda arvutuseeskirjad puit-betoon komposiitpaneeli konstrueerimiseks. Tabelis 1.2 on esitatud katsetest saadud tulemused ja talade purunemiskohad.

**Tabel 1.2.** Katsekehade maksimaalne kandevõime

Katsekeha	Maksimaalne koormus, kN	Purunemiskoht
Tala 1	11,30	Alumine puitvöö purunes ogaplaatide kinnituskohalt, ogaplaadid tulid alumise puitvöö küljest lahti
Tala 2	11,11	Alumine puitvöö purunes ogaplaatide kinnituskohalt
Tala 3	11,01	Alumine puitvöö purunes ogaplaatide kinnituskohalt
Paneel 1	21,33	Alumine puitvöö purunes ogaplaatide kinnituskohalt kuna ogaplaadid tulid puitvöö küljest lahti
Paneel 2	19,95	Alumine puitvöö purunes ogaplaatide kinnituskohalt kuna ogaplaadid tulid puitvöö küljest lahti
Paneel 3	22,65	Alumine puitvöö purunes ogaplaatide kinnituskohalt kuna ogaplaadid tulid puitvöö küljest lahti

Uuriti ka puidu ja betooni vahelise komposiitkäitumise olemasolu. Katse tulemuste võrdluses arvutustega andsid arvutusmeetod ja programm TrussCon suurema läbipainde sama koormuse juures. Katsekehade nõrgimaks kohaks olid alumine puitvöö, mis pragunes ogaplaadi kinnituskohadest. Selgus, et betoonplaat lisab konstruktsioonile omakaalu tõttu Posi-talal lisakoormust aga nihkekinnitite efektiivse toimimisega on puit-betoon komposiitpaneelis deformatsioonid väiksemad, kui Posi-talal. (Otsus, 2013)

1984. aastal Ulf Arne Girhammar tegi uurimistöö teemal „Puit ja betoon komposiitkomponendid seinale“. Selles uurimistöös uuriti puit-betoon seinaelementi, mis koosnes 50mm paksusest betoonplaadist ja puitpostidest mõõtudega 50×150mm. Puitpostid ja betoonplaadid olid omavahel kinnitatud tsingitud ogaplaatidega, Hydro-Nail E. Komposiitelelemendis olid koormust vastu võtvaks osaks puitpostid. Leiti, et betoonplaadi käitumine mõjutab komposiitelelemendi üldist tugevust, olenevalt sellest, kas betoonplaat on surutud või tõmmatud. Lisaks sõltub komposiitelelemendi tugevus ogaplaadi jäikusest (nihkemoodul K) betoonplaadi ja puitposti vahel. Ühenduse puhul, mis on väga elastsed ( $K \rightarrow 0$ ), puudub kahe elemendi vahel komposiitne käitumine ja raudbetoonplaat hakkab pragunema paindepinge tõttu nii surve- kui tõmbepingel korral. Väga jäiga ühenduse ( $K \rightarrow \infty$ ) korral on elemendi käitumine sarnane komposiitelelemendi käitumisele koos täieliku komposiitse töötamisega ja raudbetoonplaat praguneb ainult tõmbepingel korral. Selles uurimistöös leiti, et komposiitelelemendi jäikust saab suurendada, kui tõsta ogaplaatide arvu konstruktsioonis. (Girhammar, 1984)

Leander A. Bathon, Oliver Bletz ja Jenz Schmidt tegid uurimistöö „Orkaanikindlad hooned – innovaatiline lahendus kasutades eeltoodetud puit-betoon komposiitelemente“. Antud uurimistöös keskenduti puit-betoon komposiitkonstruktsioonile millel oli betoonplaat seotud

puitsõrestikuga. Uurimistöös soovitati kasutada betoonplaati välispinnas ja puitosa sisepinnas kuna betoonplaat peab paremini vastu orkaani kahjustustele, lisaks soovitati betoonplaadi paksus võtta vähemalt 100 mm. Leiti et puidu kasutamine vähendab konstruktsiooni omakaalu ja puidu vahelised suured vahed annavad võimaluse soojustuse lisamiseks. Komposiitelemendi positiivsete omadusena toodi välja, et betoonplaadi osa suurendab vastupidavust, tulekindlust ning jäikust ja puidust osa annab võimaluse vähendada omakaalu. Uurimus näitas, et puit-betoon komposiitelemendid on vastupidavamad ja samal ajal ökonoomsemad kui kaasaegne puit- või betoonmaja. (Bathon, Bletz, & Schmidt, 2006)

## **1.2 Puit-betoon komposiit-seinaelement**

Komposiitelemendi puhul on tegemist materjaliga, kus kasutatakse erinevaid materjale nii, et materjalid ei muutuks üksteise suhtes domineerivaks, vaid kasutatakse püstitatud eesmärgi nimel erinevate materjalide füüsikalisi ja mehhaanilisi omadusi nende võimalikult efektiivse koostoime saavutamiseks. Selleks kasutatakse tugevamaid materjale rohkem koormatud piirkondades ja vähem koormatud piirkondades kasutatakse nõrgemaid materjale. Eesmärgiks on saada efektiivsem lahendus, vähendada konstruktsiooni paksust ja saada sama ristlõike juures tugevam kandevõime. (Õiger, 2006)

Praegusel ajal on erinevate komposiitelementide kasutatavus suurenenud. Selle põhjuseks on erinevate komposiitmaterjalide eelised tavapäraste konstruktsioonide ees. Komposiitelementide eelisteks on suur tugevus väikese kaalu juures, jäikuse ja kaalu suhe, korrosioonikindlus, vastupidavus ning arhitektuursete võimaluste rohkus. Kõige suuremaks miinuseks on komposiitelementide juures asjaolu, et peaaegu võimatu on tagada täielikult jäika kinnitust erinevate materjalide vahel. (Schnabl, Planinc, & Turk, 2013)

Puit-betoon komposiitelement koosneb enamasti kolmest komponendist: puidust, betoonist ja nihkeühendusest. Seejuures on võimalik kasutada erinevaid materjale. Näiteks võib kasutada täispuitu, liimpuitu, puit-metall sõrestikposti, või lamineeritud puitu, tavalist betooni või kergbetooni. (Martins, Dias, Costa, & Santos, 2015)

Komposiitelementide üheks peamiseks ideeks on kasutada erinevaid materjale kohtades, kus saab nende omadusi kõige paremini ära kasutada. Puit-betoon komposiitelemendi puhul

pannakse betoon kohtadesse, kus tuleb vastu võtta survepingeid ja puidust osa pannakse piirkonda, kus tekivad tõmbepingeid. (Miotto & Dias, 2015)

Hoolimata puit-betoon komposiitelementide vaieldamatutest eelistest on nendega seotud ka teatud probleemid, mis takistavad nende levikut. Üheks peamiseks probleemiks on nende tootmise suur tööjõukulu. Lõplik ehitamise kulu on oluliselt mõjutatud nihkeühenduste süsteemist. (Chuan, 2010)

### **1.3 Ajalugu**

Puit-betoon komposiitelement on suhtelistelt uus tehnoloogia. Euroopas hakati puidu ja betooni koos kasutamise võimalusi välja töötama 20. sajandi esimestel kümnenditel, mis oli põhjustatud armatuurterase vähesusest (Destro, et al., 2015). Teras defitsiit oli sellel ajal põhjustatud Esimesest maailmasõjast.

Esimesed hooned mille jaoks hakati puidu ja betooni koos kasutamise võimalusi välja töötama olid põllumajandus- ja tootmishooned, kus komposiitelement oli mõeldud seinalelemendina (Girhammar, 1984). Betoonplaat oli paigaldatud sissepoole, mis annab vastupidavuse erinevatele kahjustustele ja puit postid asetsesid väljaspool ning olid välisviimistluse aluseks. Ühtlasi töötas puidust osa ka tuulekoormustele, kus puit ja betoon töötasid vastavalt kas tõmbele või survele. (Hassan, Schedin, & Girhammar, 2012)

Ühed suuremad komposiitkonstruktsioonide täismõõtmetes paindekatsed toimusid 1938-1942. aastal Illinoisi Ülikoolis Ameerikas. Sealsete katsete peamiseks eesmärgiks oli võrrelda erinevaid nihkeühendusi. (Costa, 2011)

Puit-betoon komposiitelementide peamiseks kasutusvaldkonnaks jäi vanade hoonete restaureerimine. Viimase 50 aasta jooksul on puit-betoon komposiitkonstruktsioonide vastu huvi suurenenud, mille tulemusena on hakatud kasutama komposiitkonstruktsioone sildade ja hoonete ehitamisel ning vanade puidust põrandate uuendamisel. (Chuan, 2010)

Esimene patent betoonplaadi ja puidust tala ühendamiseks võeti naelliite süsteemile 1922. aastal Mülleri poolt. (Linden, 1999)

Esimest projekteerimismudelit puit-betoon elemendile tutvustati 1984. aastal tehtud uurimistöö põhjal, kus katsetuste tulemused näitasid, et komposiitkäitumine suurendab puit-betoon komposiitpõranda kandevõimet võrreldes puitpõrandaga 2,5 korda. (Rijal, Samali, Crews, & Shrestha, 2010)

Esimene TimBet elementidest hoone toodeti Eestis 2014 aasta alguses. Hoone püstitati Norras Bergenisse. Tegemist oli ridaelamuga, mille ehitusalune pind oli ~400 m<sup>2</sup>.

Eesti esimesed eluhooned, mis on ehitatud TimBet seinapaneelidest, valmisid 2014. aasta lõpus Tartus Kuru tänaval. Nende hoonete puhul on tegemist kortermajadega, mille ehitusalune pind on mõlemal 304 m<sup>2</sup>.

## **1.4 Seinaelemendi tootmine**

Puit-betoon seinaelemendi puhul võib koormuse kanda vundamendile nii betoonplaadi kui ka sõrestikposti kaudu. Antud magistritöös kasutatud paneelide juures on koormatud betoonplaati. Puit-metall sõrestikposte valmistatakse kahest tugevussorteeritud puitpostist, mis seotakse omavahel Posi ogaplaatidega. Puidu ja betooni vahelises nihkeliites kasutatakse MiTek Top W ogaplaate. Ogaplaatide ja puidust postide ühendused tuleb teha spetsiaalse pressiga, mis on näidatud joonisel 1.2. Puit-metall sõrestikpostide paksus sõltub kasutatavatest puitpostide mõõtmetest ja ogaplaatide mõõtmetest. Eestis tegeleb puit-betoon seinapaneelide tootmisega Alusehitus OÜ. Seinapaneelide tootmisel kasutatakse puitvöödes puitu mõõtmetega:

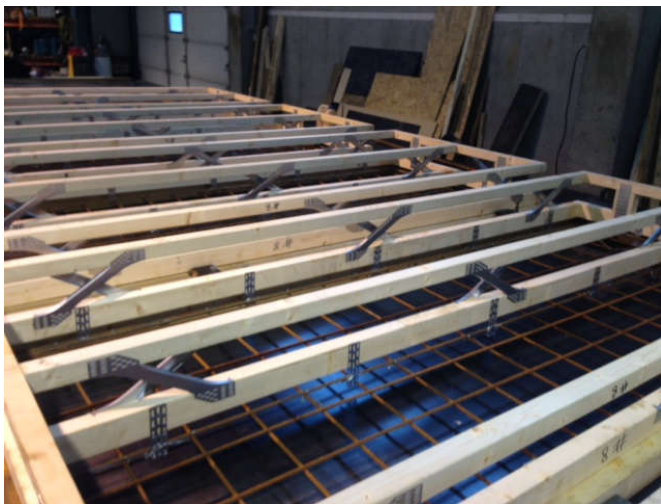
- 45 × 45mm
- 70 × 45mm
- 90 × 45mm

Posi ogaplaatide laiused jäävad 108 mm ja 210 mm vahele. Soojustuskihi minimaalne paksus on seega 220 mm ja maksimaalne paksus on 370 mm.



**Joonis 1.2.** Hüdrauliline press sõrestikpostide valmistamiseks

Pärast puit-metall sõrestikpostidest raami valmimist asetatakse see terasalusele, kuhu varasemalt on paigaldatud armatuurvõrk. Komposiitpaneeli betoneerimiseks eel fikseeritakse armatuurvõrgud nihkeankrute külge traadi abil ning seejärel toimub elementide betoneerimine. Joonisel 1.3 on näha elemendid enne betoneerimist.



**Joonis 1.3.** Katsekehad enne betoneerimist

Peale betooni kividemist soojustatakse elemendid polüuretaan vahuga (edaspidi PUR vaht). Seinaelemendi soojustamiseks kasutatakse nii kinniste kui ka lahtiste pooridega PUR vahtu. Joonisel 1.4 on näidatud üks võimalikest seinapaneeli lahendustest, mille omakaal on  $154 \text{ kg/m}^2$  ja  $U$  arv on  $0,096 \text{ W/m}^2\text{K}$ . (ConcreTech, 2017)



**Joonis 1.4.** Seinapaneeli võimalik lahendus

PUR vahu kasutamise eelised:

- puuduvad vuugid ja pilud
- maksimaalsed soojustusomadused minimaalse paksusega isolatsioonikihi juures
- soojustust saab paigaldada ebatasasele ja raskesti ligipääsetavatesse kohtadesse
- suurepärane nakkuvus aluspinnaga
- kiire paigaldus (TimBet, 2017)

Lahtiste pooridega PUR vaht on kinniste pooridega vahust nõrgem ning soojapidavus on enam-vähem nagu villal, aga selle mikropoorne struktuur laseb veeaurul välja kuivada, ise seejuures vett mitte sisse imades. Kinniste pooridega vaht on ligi kaks korda parema soojapidavusega, kui teised tavapäraselt kasutatavad soojustusmaterjalid. Kasutades suletud pooridega PUR vahtu ei ole tarvis hoonele lisada tuuletõket ja aurutõket. (Eesti Puitmaja Ehitus, 2017)

## 1.5 Puit-betoon seinaelementide eelised ja puudused

Puit-betoon seinapaneelide peamisteks eelisteks on nende suur tugevus väikese kaalu juures, jäikuse ja kaalu suhe, korrosioonikindlus, vastupidavus ning arhitektuursete võimaluste rohkus.

Puit-betoon konstruktsiooni positiivsed omadused:

- kergesti teostatav siseviimistlus
- kivimajale sarnane sisekliima
- universaalsed fassaadilahendused
- kommunikatsioon lihtne paigaldada elementidesse
- kiirelt monteeritav
- väike omakaal (TimBet, 2017)

Puit-betoon komposiitelementide helikindlus on parem võrreldes puitkonstruktsiooniga nii löögimüra kui ka õhumüra suhtes ja betoonkonstruktsiooni puhul on tulemused sarnased. (Martins, Santos, Almeida, Godinho, & Alfredo, 2015)

Võrreldes puit-betoon seinapaneeli ja tavalist puitkarkass seina, siis seinapaneelil lisaks olev betoonplaat annab konstruktsioonile suurema tugevuse, parema jäikuse ja tulekindluse. Ehitusplatsil käib paneelide montaaž kiiresti, mis viib tööjõukulud ehitusplatsil väikeseks. Kuna betoonplaadi soojusmahtuvus on suurem kui puidu soojusmahtuvus siis selle tõttu on puit-betoon elementidest hoone sisekliima ühtlasema temperatuuriga.

Puit-betoon seinaelementide puuduseks võrreldes puitkarkass-seinaga on nende tootmisel tekkiv suur tööjõukulu ja ühenduste keerukus viib ehituse kallimaks. Lisaks on puit-betoon seinaelement suurema omakaaluga.

Puit-betoon seinapaneeli eeliseks betoonelementide ees on nende väiksem omakaal, võimalik vähendada soojustuskihi ja elemendi kogupaksust. Ühtlasi on nende omakaalu ja paneeli poolt vastu võetava koormuse suhe parem.

Puit-betoon komposiitelementide puudusteks võrreldes raudbetoon seinapaneelidega on nende puitosade biokahjustuste oht. Hoonete tuleohutusest tulenevad nõuded ei luba üldjuhul TP2 ja TP3 klassi kuuluvaid hooneid ehitada Eestis kõrgemaid kui kahe korruselisi ja kõrgust ei tohi olla rohkem kui 9 m (Ehitisele esitatavad tuleohutusnõuded, Lisa 2, 2015).

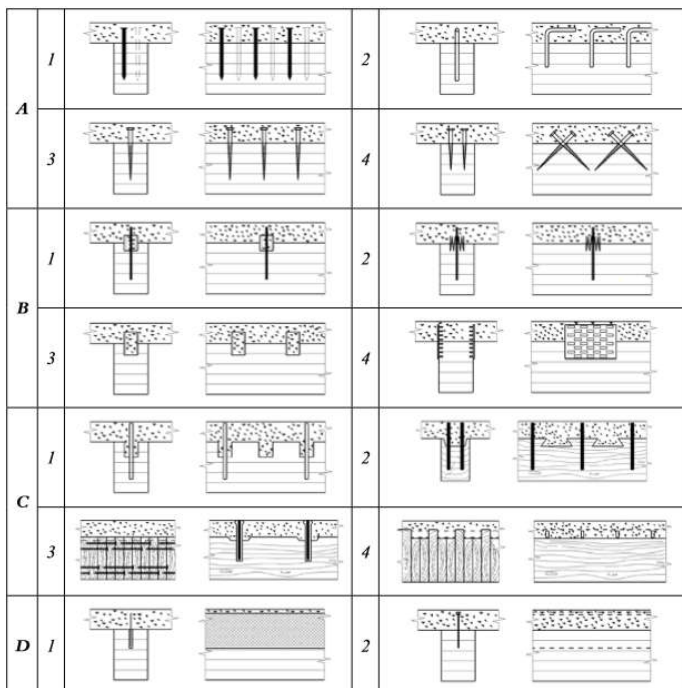
Julius K. Natterer on leidnud oma uurimistöös, et kasutades puit-betoon komposiitelementi on võimalik suurendada tulepüsivust ja vähendada omakaalu võrreldes betoonelementidega. (Natterer, 2002)



## 1.6 Komposiitelementide vahelised nihkeankrud

Puit-betoon seinapaneelide nihkeühenduste loomiseks on kõige enam kasutatud nael-, polt-, liim- ja tappühendusi. (Girhammar, 1984)

Joonisel 1.5 on välja toodud kõige sagedasemalt kasutatavad meetodid puidu ja betooni ühendamiseks. Nihkeankrud on grupeeritud nende jäikuse järgi nelja gruppi: grupis A olevad ankrud on kõige väiksema jäikusega ja grupis D on kõige jäigemad ühendused.



**Joonis 1.5.** Puit-betoon komposiitelementide erinevad liited: (Lukaszewska, 2009)

(A1) naelliide; (A2) Väänatud armatuuriga liide, liimitud; (A3/4) Kruviliide; (B1/2) rõngastüübel ja hammasplaat ühendus; (B3) terastoru ühendus; (B4) ogaplaat ühendus; (C1) ümar auk puidus ja ankur koos hoidmiseks; (C2) nelinurkne sisselõige ja kinnitid; (C3) süvend puidus ja eelpingestatud teraslatt; (C4) naelutatud puidust laudadega põrand ja väänatud teras surutud läbi sügavamate laudade; (D1) terasvõre liimitud betooni külge; (D2) terasplaat liimitud puidu külge

Komposiitelementide konstruktsiooni efektiivsus oleneb kihtide vahelisest nihkeühenduste jäikusest. Selle tõttu ühenduste süsteem, mille korral komposiitkäitumine on suur, annavad võimaluse kasutada saledamaid elemente. (Chuan, 2010)

## 2 KATSEKEHADE JA KATSETE KIRJELDUS

### 2.1 Katsekehades kasutatud materjalid

#### 2.1.1 Raudbetoon

Betooni kasutatakse laialdaselt selle väga hea survetugevuse tõttu, kuid tõmbele töötab betoon halvasti. Betooni tõmbetugevus on 10-15 korda väiksem kui survetugevus (Valgur, 2014). Betooni väikese tõmbetugevuse tõttu lisatakse konstruktsioonile terasarmatuur, mis töötab hästi nii tõmbele kui ka survele ja terase ülesandeks jääb tõmbetugevuse vastu võtmine. Selleks, et terasarmatuur ja betoon koos hästi töötaksid tuleb terasarmatuurile valida õige diameeter ja samm, tagatud peab olema nende omavaheline nakkumine. Tabelis 2.1 on välja toodud käesoleva töö katsetes kasutatud betooni tugevus- ja deformatsiooniomadused ja Tabelis 2.2 on näidatud terasarmatuuri tugevusnäitajad.

**Tabel 2.1.** Betooni (tugevusklass C30/37) tugevus- ja deformatsiooniomadused (Otsmaa, Pello, & Sooru, 2014)

Tugevus- ja deformatsiooniomadused	Tähistus	Väärtus, N/mm <sup>2</sup>
Normsurvetugevus	$f_{ck}$	30
Keskmine survetugevus	$f_{cm}$	38
Keskmine tõmbetugevus	$f_{ctm}$	2,9
Alumine (95% tõenäosusega) normtõmbetugevus	$f_{ctk,0,005}$	2,0
Ülemine (5% tõenäosusega) normtõmbetugevus	$f_{ctk,0,95}$	3,8
Deformatsioonimoodul	$E_{cm}$	33000
Arvutussurvetugevus	$f_{cd}$	20
Arvutustõmbetugevus	$f_{ctd}$	1,35

**Tabel 2.2.** Terasarmatuuri (tugevusklass B500B) tugevusomadused (Otsmaa, Pello, & Sooru, 2014)

Tugevusomadus	Tähistus	Väärtus, N/mm <sup>2</sup>
Normtugevus	$f_{yk}$	500
Arvutustugevus	$f_{yd}$	435

### 2.1.2 Puit

Puidu nõrgaks küljeks on asjaolu, et selles esineb palju puidurikkeid, mis nõrgestavad materjali. Puidurikked on oksad, kaldkiulusis ja erinevad vormirikked, mis on puidu kasvamise tavapärane tulemus. Puidu omadused ei ole risti- ja pikikiudu samad ehk puidu puhul on tegemist anisotroopse materjaliga. Selle tõttu määratakse puidu tugevus nii, et tugevus oleks tagatud nii risti- kui ka pikikiudu. (Ilmet, 2006)

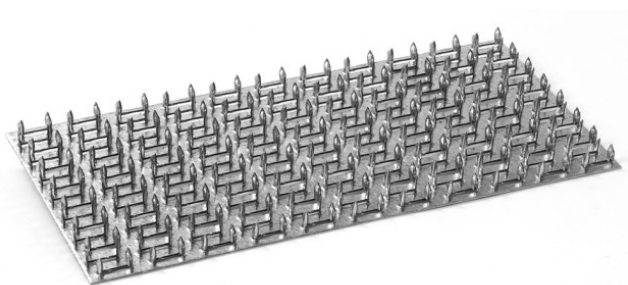
Puidu tugevusklassi tähistatakse tähega C, millele järgnev number näitab puidu paindetugevust. Tabelis 2.3 on välja toodud antud katsekehades kasutatud puidu tugevusomadused.

**Tabel 2.3.** Okaspuidust (tugevusklass C24) saematerjali omadused (Masso, et al., 2014)

Omadus	Tähistus	Väärtus, N/mm <sup>2</sup>
<b>Tugevus</b>		
Paindetugevus	$f_{m,k}$	24
Tõmbetugevus piki kiudu	$f_{t,0,k}$	14,5
Tõmbetugevus ristikiudu	$f_{t,90,k}$	0,4
Survetugevus piki kiudu	$f_{c,0,k}$	21
Survetugevus ristikiudu	$f_{c,90,k}$	2,5
Nihketugevus	$f_{v,k}$	4,0
<b>Jäikus</b>		
Elastsusmoodul piki kiudu	$E_{0,mean}$	11000
Elastsusmoodul 5% piki kiudu	$E_{0,05}$	7400
Elastsusmoodul ristikiudu	$E_{90,mean}$	370
Nihkemoodul	$G_{mean}$	690

### 2.1.3 Ogaplaadid

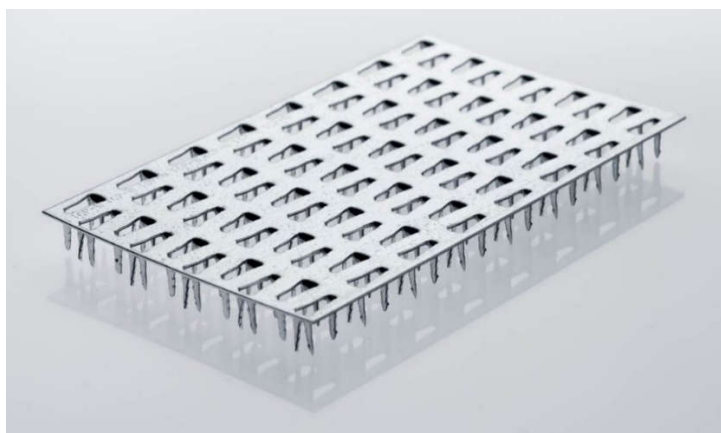
Puit-betoon komposiitpaneelide katsekehades oli kasutatud Posi PS8, MiTek GNT 100S ja MiTek TOP-W 36x62 mm ogaplaate.



**Joonis 2.1.** MiTek GNT 100S ogaplaat (MiTek Industrial AB, 2017)

**Tabel 2.4.** MiTek GNT 100S (MiTek Industrial AB, 2013)

Omadus	Tähistus	Väärtus
Nakketugevus pikikiudu	$F_{a,0,0}$	2,63 N/mm <sup>2</sup>
Nakketugevus ristikiudu	$F_{a,90,90}$	1,52 N/mm <sup>2</sup>
Tõmbetugevus plaadi laiusühikule pikikiudu	$F_{t,0}$	211 N/mm
Tõmbetugevus plaadi laiusühikule ristikiudu	$F_{t,90}$	144 N/mm
Survetugevus plaadi laiusühikule pikikiudu	$F_{c,0}$	77 N/mm
Survetugevus plaadi laiusühikule ristikiudu	$F_{c,90}$	75 N/mm
Nihketugevus pikikiudu	$F_{v,0}$	75 N/mm
Nihketugevus ristikiudu	$F_{v,90}$	56 N/mm
Keskmine nihkemoodul	$K_{ser,mean}$	11,1 N/mm <sup>3</sup>



**Joonis 2.2.** MiTek TOP-W ogaplaat (MiTek Industrial AB, 2017)

**Tabel 2.5.** MiTek TOP-W (MiTek Industrial AB, 2013)

Omadus	Tähistus	Väärtus
Nakketugevus piki kiudu	$F_{a,0,0}$	2,63 N/mm <sup>2</sup>
Nakketugevus ristikiudu	$F_{a,90,90}$	1,52 N/mm <sup>2</sup>
Tõmbetugevus piki kiudu	$F_{t,0}$	211 N/mm
Tõmbetugevus ristikiudu	$F_{t,90}$	144 N/mm
Survetugevus piki kiudu	$F_{c,0}$	77 N/mm
Survetugevus ristikiudu	$F_{c,90}$	75 N/mm
Nihketugevus piki kiudu	$F_{v,0}$	75 N/mm
Nihketugevus ristikiudu	$F_{v,90}$	56 N/mm
Keskmine nihkemoodul	$K_{ser,mean}$	11,1 N/mm <sup>3</sup>

## **2.2 Katsete metoodika ja katsekehade kirjeldus**

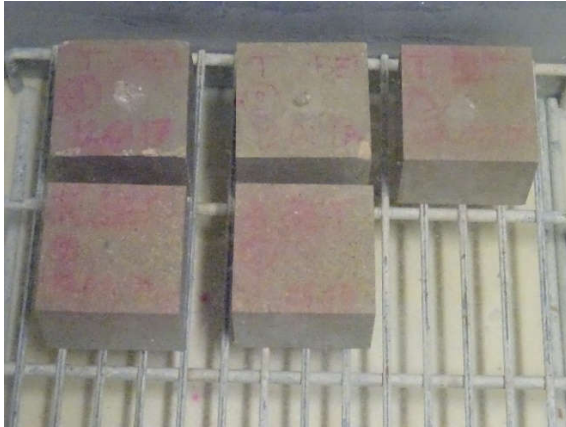
Antud magistritöös tehtavate katsete eesmärgiks oli määrata Alusehituse OÜ poolt toodetud puit-betoon komposiit-seinapaneelide kandevõime ja sooritada katsetulemuste hindamiseks võrdlevad arvutused. Selle jaoks tehti kolm erinevat katseseeriat. Katsete käigus purustati seinapaneelid, tehti seinapaneelis kasutatavate puit-metall sõrestikpostide paindekatsed ja betooni survetugevuse kontrolliks purustati kuubikujulised katsekehad. Käesolevas magistritöös kasutatavates seinapaneelides on kandvaks osaks betoonplaat.

### **2.2.1 Betooni survetugevuse määramine**

Betooni hindamisel kasutatavaks kvaliteedinäitajaks on betooni klass või mark. Klass näitab 95% tõenäosusega garanteeritud näitaja suurust ja mark näitab antud näitaja keskmist suurust.

Betooni survetugevust loetakse betooni põhiliseks kvaliteedinäitajaks, sest survetugevus iseloomustab kaudselt teisi betooni deformatsiooni- ja tugevusomadusi. Betooni tugevusklass näitab betooni 95% tõenäosusega tagatud silindrilist või kuubikulist survetugevust, mida tähistatakse C20/25, sellise tähise puhul peab olema garanteeritud 95% tõenäosusega betooni silindriline survetugevus 20 MPa ja kuubikuline survetugevus 25 MPa.

Betooni survetugevuse kontrollimiseks võeti seinapaneelide betoneerimisel 5 kuubikulist proovikeha, millest 3 oli tavalisest betoonist kuubikud ja 2 olid kiudbetoonist valmistatud katsekehad. Kuubikulised katsekehad võeti EVS-EN 12390-1:2012 standardile vastavate vormidega, mille mõõtmed olid 100x100x100 mm ja märgistati vastavalt, et hiljem identifitseerida. Katsekehad seisis esimese päeva OÜ Alusehitus ruumides plastmassist vormides ja seejärel hoiti katsekehi kuni 28 päeva vanuseni Eesti Maaülikooli laboris vees, kus temperatuur oli 19,6°C juures. Joonisel 2.3 on näidatud katsekuubikud.



**Joonis 2.3.** Kuubikujulised katsekehad vees seismas

Betooni survetugevuse katsed viidi läbi Eesti Maaülikooli laboris. Survetugevuse määramiseks kasutati universaalset katsemasinat P-125, mis on näidatud joonisel 2.4. Antud katseseadet on võimalik kasutada kahes režiimis, millest ühel juhul maksimaalne survetugevus on 1250 kN ja mõõtmistäpsus 2,5 kN ning teises režiimis on maksimaalne koormus 625 kN ja mõõtmistäpsus 1,25 kN. Katsete teostamisel otsustati kasutada tugevamat režiimi kuna katsetused toimusid C30/37 klassi betooniga. Katsete teostamisel lähtuti standardist EVS-EN 12390-3:2009.



**Joonis 2.4.** Universaalne katsemasin P-125

Standardist EVS-EN 12390-2009 lähtudes tuleb katsekehi koormata ühtlaselt kuni nende purunemiseni. Koormus, mille all katsekeha purunes, tuleb registreerida ja hiljem

arvutatakse selle järgi betooni survetugevuse klass. (Betooni katsetamine Osa 3: Katsekehade survetugevus, 2009)

Katsete läbiviimisel tuli juhindudes standardist jälgida:

- Katsekehade ja katse seadme koormuspinnad peavad olema puhtad
- Katsekehi tuleb suruda risti valamise suunaga
- Katsekehad tuleb asetada surveplaatide keskele
- Katsekehi tuleb koormata ühtlase kiirusega
- Katsekeha purunemispilti

$$f_c = F/A_c \quad (2.2.1)$$

Kus  $f_c$  on betooni survetugevus N/mm<sup>2</sup>;

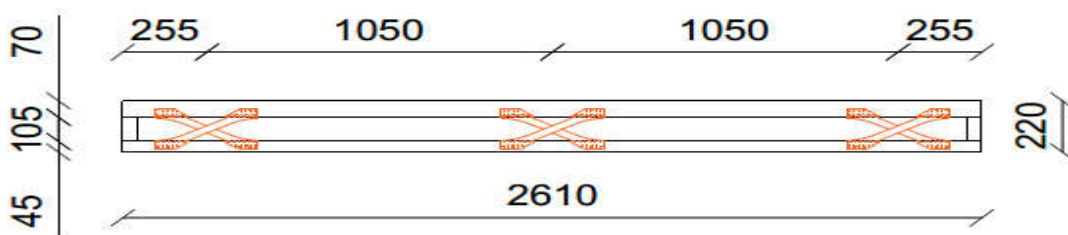
$F$  – suurim koormus N;

$A_c$  – katsekeha ristlõikepind, millele survejõud mõjub mm<sup>2</sup>.

Betooni survetugevuse kontrollimiseks purustati kuubikulised katsekehad 9. veebruaril 2017 aastal, kui katsekehad olid 28 päeva vanused.

## 2.2.2 Posi-talade paindekatse

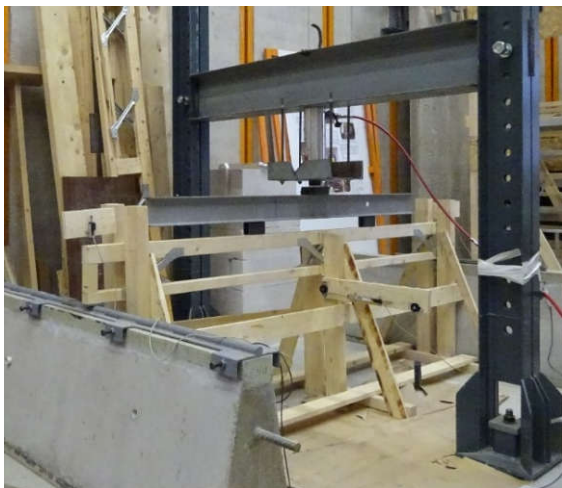
Posi talade paindejäikuse (EI) määramiseks valmistati 6 puit-metall sõrestiktala, mis olid sarnased komposiitpaneelides kasutatud Posi-postidega. Talade mõõtmed olid 45x220x2610 mm, mis on sarnased kui komposiitelemendil, aga erinesid vööde otste omavahelise kinnituse poolest. Katsetes kasutatud puit-metall sõrestiktala on näidatud joonisel 2.5.



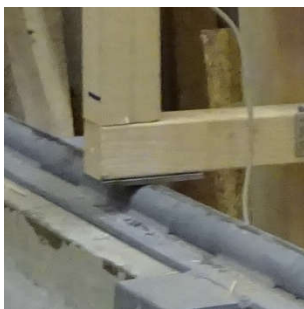
Joonis 2.5. Posi-tala mõõtmed

Antud katsekehade puhul pandi otste vahele puidust klotsid, mis ühendasid ülemist ja alumist vööd. Klotsid olid mõõtmetega 45×45×105 mm ja kinnitati vööde külge puidukruvidega. Puit-metall sõrestiktaladel on kasutatud kuut Posi PS-8 ogaplaati, mille asetus on näidatud joonisel 2.5. Talade valmistamisel on kasutatud tugevussorteeritud puitu, mille tugevusklass on C24. Tugevusklassi C24 tugevusomadused on näidatud tabelis 2.3.

Posi talade paindekatsed viidi läbi Eesti Maaülikooli maaehituse osakonna laboris. Paindekatseid teostades koormati talasid sümmeetriliselt kahest punktist. Koormatud punktid asusid 1/3 sildeava kaugusel tugedest. Silde pikkuseks oli 2550 mm. Paindekatse skeem on näidatud joonise 2.6. Katsekeha üks ots toetus liikumatule toele, mis on näidatud joonisel 2.7 ja teine ots toetus liikuvale toele, mis on näidatud joonisel 2.8. Tugede ja katsekehade vahele lisati muljumise vältimiseks terasplaadid, mille mõõtmed olid 50x100 mm. Posi-talade kiivumise vältimiseks ehitati talade külgedelt toetamiseks ajutine konstruktsioon, mida on näha joonisel 2.6.



**Joonis 2.6.** Paindekatse skeem



**Joonis 2.7.** Liikumatu liigendtugi



**Joonis 2.8.** Liikuv liigendtugi



Katsete teostamisel kasutati koormuse rakendamiseks survesilindrit Lukas LZM 25-200, mis on näidatud joonisel 2.9. Antud survesilindri maksimaalne koormus on 250 kN. Rõhu mõõtmiseks silindris kasutati digitaalset rõhuandurit FD821421U, mille mõõtmistäpsuseks on 0,1 baar. Silindrilt tulev koormus läks IPE 120 talale, mille abil jaotati koormus kahele nelikanttorule mõõtmetega 80×40×3 mm ja mida mööda kandus koormus katsekehale. Silindri poolt tekitatud survele lisati koormuse hulka ka IPE 120 tala omakaal, milleks oli 19,7 kg. Lisaks paigaldati IPE 120 tala peale kaks terasplaati mõõtmetega 100x100x20 mm.



**Joonis 2.9.** Survesilinder Lukaz LZM 25-200

Katsekehade läbipainde saamiseks kasutati nihkeandurit, mis paigaldati katsekeha keskele. Nihkeanduri ja survesilindri lugemid salvestati Almemo 5690-2 andmelugeja abil, mis on näidatud joonisel 2.15. Saadud tulemuste abil arvutatakse katsekehade paindejäikused valemiga 2.2.2. Puit-metall sõrestikpostide purunemise aeg planeeriti vastavalt EVS-EN 408:2010+A1:2012 300±120 sekundit.

Paindejäikus arvutamiseks kasutati valemit 2.2.2.

$$EI = \frac{23}{648} \times \frac{P \times l^3}{\Delta}, \quad (2.2.2.)$$

Kus  $EI$  on Paindejäikus Nmm<sup>2</sup>;

$P$  – koormus kN;

$l$  – tugede vaheline kaugus mm;

$\Delta$  – läbipaine mm.

### 2.2.3 Puit-betoon seinapaneelid

Katsete sooritamiseks kasutati puit-betoon seinaelemente, mille kõrguseks oli 2700 mm, laiuks 1200 mm ja sügavuseks 300 mm. Betoonplaadi paksus oli 80 mm ja Posi postide mõõtudeks oli 45x220x2700 mm. Puit-betoon seinapaneelist katsekeha on näidatud joonisel 2.10.



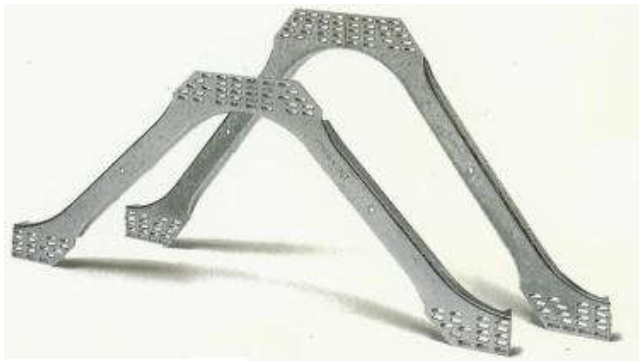
**Joonis 2.10.** Puit-betoon seinapaneel valmis kujul

**Tabel 2.6.** Puit-betoon seinaelementide katseseeriad

Katseseeria	Betooni tugevusklass	Armeering	Armeeringu silm/kogus	Katsekehade arv	Paneeli nr.
I	C30/37	6 mm	170×160mm	3	1, 2, 3
II	C30/37	8 mm	170×160mm	3	4, 5, 6
III	C30/37	Kiud	25 kg/m <sup>3</sup>	3	7, 8, 9

Tabelis 2.6 on välja toodud katseseeriade andmed. Katsekehades kasutatud betooni tugevusklassiks oli tootja poolt antud C30/37. Betoonplaadi armeerimiseks kasutati 6 ja 8 mm võrkarmatuuri, mille sammuks põikarmatuuril oli 170 mm ja pikiarmatuuri sammuks 160 mm. Osade katsekehade valmistamisel oli kasutatud kiudbetooni, kuhu oli lisatud 25 kg/m<sup>3</sup> teraskiudu. Kokku valmistati 9 katsekeha, millest 3 oli kiudbetooniga, 3 oli 6mm armatuuriga ja 3 oli 8mm armatuurvõrguga. Ühe katsekeha transportimisel oli Posi postid saanud kannatada ja selle tõttu otsustati, et antud elemendilt lõigatakse puidust osa ära ja katsetatakse betoonplaati üksinda. Kannatada saanud seinapaneel oli armeeritud 6 mm armatuurterasega. Armatuurterase klass on B500B, mille tugevusnäitajad on välja toodud tabelis 2.2. Posi postide vöödes kasutati C24 tugevusklassiga puitu, mille omadused on välja toodud tabelis 2.3. Posi postides kasutatud puitmaterjal oli vöödes mõõtmetega 70×45 mm

ja 45×45 mm. Posi postide sisemine vöö oli tehtud 70×45 mm materjalist ja välimises vöös oli kasutatud 45×45 mm puitmaterjali. Puitvööde omavahel ühendamiseks kasutati MiTeki poolt toodetavat Posi PS-8 ogaplaate, mis on näidatud joonisel 2.11.



**Joonis 2.11.** Posi PS-8 ogaplaat (MiTeK, 2017)

Posi postide otsad olid omavahel ühendatud horisontaalsete puidust ühendustega, mille jaoks kasutati sisemises vöös 70×45 mm puitu ja välimises vöös 45×45 mm läbimõõduga puitu. Talad toestati omavahel klotsidega, mille mõõdud olid 45×120 mm ja pikkusega 105mm. Omavahel ühendati vööd ja klotsid ogaplaatidega MiTek GNT 100S, mida on näha joonisel 2.1. ja tugevusomadused on välja toodu tabelis 2.4. Iga seinapaneeli külge kinnitati 3 Posi posti. Puit-metall sõrestikpostid ja betoonelement ühendati omavahel MiTek ogaplaatidega Top-W 36×125 mm, mis on näidatud joonisel 2.2 ja tugevusomadused on tabelis 2.5. Ogaplaatide asukohad ja betoonplaadi paksuse mõõtmistulemused on välja toodud lisas 1..

Kõik katsekehad ei olnud mõõtmete poolest täielikult identsed. Katsekehadel esines väikeseid erinevusi nihkekinnitite asukohas ja nende betoonikihi paksuses. Leidus ka väga väikeseid hälbeid betoonplaadi mõõtmete osas. Betoonplaadi mõõtmed ja keskmine paksus on näidatud lisas 2.

Paneelide katsetamine toimus Eesti Maaülikooli maaehituse osakonna laboris, mis asub aadressil Kreutzwaldi tn. 56/4, Tartu. Paneelide kandevõime määramise katsetes koormati paneeli kahes punktis vertikaalse survejõuga ja paneeli keskpunktis horisontaalsuunalise koondatud põikkoormusega. Paneel oli alt toetatud liikumatule liigendtoele ja ülevalt vertikaalsuunas liikuvale liigendtoele. Paneelide koormamise kohad on näidatud lisas 7.

Paneeli koormati kahe survesilindriga, kuna varasemalt ebaõnnestunud katsetest selgus, et olemasolevate vahenditega ei suudeta paneele tsentrilisel surve purustada. Selle tõttu tuli

katseskeemi muuta. Katseskeem muudeti selliseks, et ühe survesilindriga koormati katsekehi ülevalt, tekitades survejõu, ja teise survesilindriga rakendati betoonplaadi keskele horisontaalkoormus, tekitades paindemomendi. Vertikaalne koormus anti silindriga Rehobot CFA 750-200, mille maksimaalne koormus on 750 kN. Rehobot CFA 750-200 asetus on näidatud joonisel 2.13. Rõhuühikute teisendamine jõuühikuteks toimus vastavalt Rehobot CFA 750-200 kalibreerimistunnistuse ATLF-17/0218 järgi vastab 1 baarile 1,057 kN. Horisontaalne koormus anti paneelile survesilindriga Lukas LZM 25-200, mille maksimaalseks jõuks on 250 kN. Horisontaalne survesilinder on näidatud joonisel 2.9 ja joonisel 2.12 on näha survesilindri paigutus katsetustel. Baaride teisendamine kN-ks toimus vastavalt seadme kalibreerimistunnistusele ATLF-16/0671, mille järgi 1 baarile vastab 0,485 kN. Rõhu mõõtmiseks survesilindrites kasutati digitaalset rõhuandurit Ahlborn FD821421U, mille mõõtmistäpsus oli 0,1baari.



**Joonis 2.12.** Horisontaalne survesilindri asetus



**Joonis 2.13.** Vertikaalse survesilindri paigutus

Kandevõimekatsete juures mõõdeti läbipainet, milleks paigaldati 7 nihkeandurit. Nihkeandurid kinnitati ajutisele konstruktsioonile ja on näha lisas 3. Horisontaalsiiret mõõtsid 6 nihkeandurit, millest kaks paiknesid paneeli alumises otsas, kaks keskel ja kaks nihkeandurit ülemises otsas ning üks andur mõõtis vertikaalset siiret. Katsetel kasutatud siirdeandur on näidatud joonisel 2.14. Siirdeandurid ühendati seinapaneeli külge traadi ja

krui abil, mille jaoks puuriti betooni väike auk ette. Siirdeanduri teise otsa ühendati raskus, mis hoidis siirdeandurit pingul. Siirdeandurite ja survecilindrite näidud saadi Almemo 5690-2 andmelugejalt, mis on näidatud joonisel 2.15.



**Joonis 2.14.** Siirdeandur



**Joonis 2.15.** Almemo 5690-2 andmelugeja

Koormus rakendati ainult betoonpinnale, selle jaoks pandi 1/5 kaugusele elemendi äärtest terasplaadid, mille mõõtmed olid 100×100×20 mm. Terasplaatide peale toetati HEA 240 tugevdatud tala millega jaotati koormus kahele punktile. Koormuse suurendamine toimus ühtlaselt: kõigepealt koormati paralleelselt mõlema survecilindriga, kuni horisontaalse survecilindri koormus jõudis 30 baarini (~15 kN), siis lõpetati sellega koormamine ja hoiti koormust ühtlaselt 30 baari juures. Edasi suurendati ainult vertikaalset koormust kuni seinapaneeli purunemiseni või kuni vertikaalne koormus jõudis 425 baarini (~450 kN). Kui jõuti vertikaalse koormusega 425 baarini, siis hakati uuesti horisontaalset koormust suurendama kuni paneel purunes. Paneelide purunemise ajaks planeeriti 300±120 sekundit.

### 3 KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

#### 3.1 Betooni survetugevuse kontrolli tulemused ja analüüs

Katsekehi koormati kuni nende purunemiseni. Enne katsekehade purustamist mõõdeti katsekehad üle ja tulemused on esitatud tabelis 3.1. Katsekehade purunemispildid on välja toodud lisas 4. Kõigi katsekehade purunemispildid olid vastavalt kehtivale standardile rahuldavad.

**Tabel 3.1.** Kuubikuliste katsekehade mõõtmised ja purustavast katsest saadud tulemused

Kuubi nr.	Mõõtmised				Purustav jõud $f_c$ , kN	Survetugevus $N/mm^2$ 28 p	Betooni klass
	a, cm	b, cm	c, cm	A, $cm^2$			
1	10.01	9.95	9.95	99.60	413000	39.43	C30/37
2	10.00	9.85	10.00	98.5	447500	43.16	C30/37
3	10.02	9.85	10.00	98.7	422500	40.75	C30/37
4	10.02	10.03	10.00	100.3	370000	35.10	C25/30
5	10.01	10.10	10.0	101.1	360000	33.86	C25/30

Märkus. Betooni survetugevuse arvutamiseks kasutati valemit 2.2.1.

Purustatavate katsete teostamisel selgus, et seinapaneelides kasutatud tavaline betoon andis tugevusklassiks C30/37 ja kiudbetooni tugevusklass oli C25/30. Tootja poolt antud betooni andmete kohaselt pidi betooni survetugevus olema C30/37, mis ühtis tavabetoonil saadud katsetulemusega, kuid kiudbetooni puhul osutus tegelik betooni tugevus väiksemaks kui oli tootja poolt antud survetugevus.

Kiudbetooni tugevusklassi C30/37 nõuetest madalam tugevus võis olla tingitud sellest, et katseproovide võtmisel oli vormides oleva segu tihendamine puudulik aga kuna kiudbetoonist seinapaneelide purunemiskoormus oli tavalisest betoonist katsekehadega võrreldes väiksem, siis ei saa ka välistada, et viga oli tehtud betooni valmistamisel.

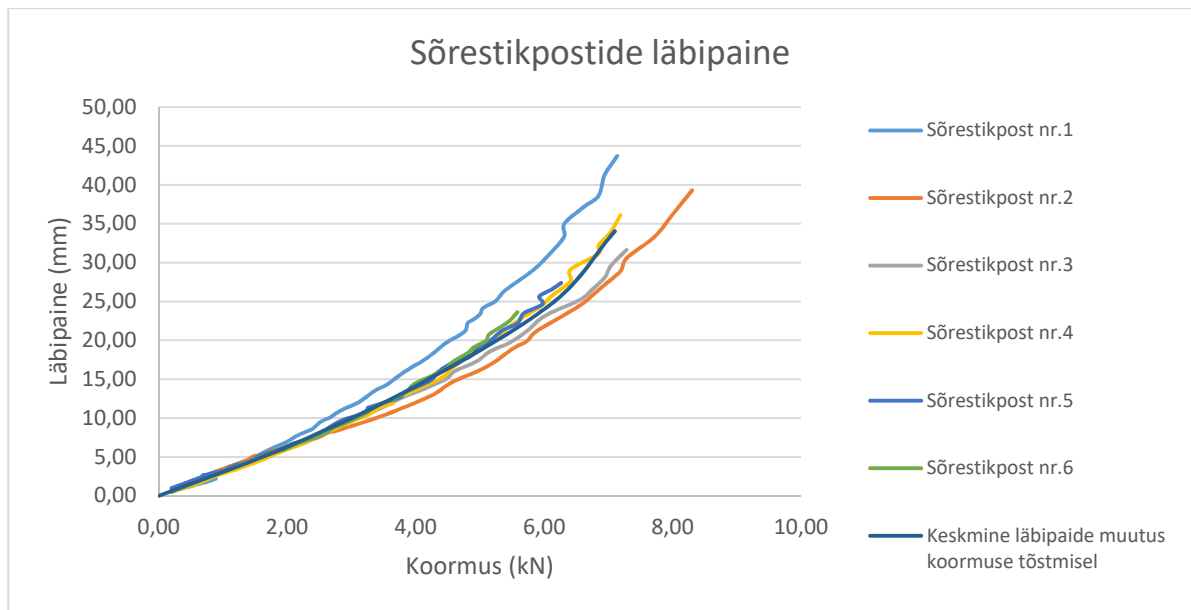
### 3.2 Puit-metall sõrestikpostide paindekandevõime

Puit-metall sõrestikpostide paindekandevõime katsetes koormati katsekehi kuni nende purunemiseni. Paindekatsete tulemused ja nende purunemise kirjeldus on välja toodud tabelis 3.2. Lisas 5 ja lisas 6 on näidatud täpsed katsekehade purunemiskohad ning purunemispildid. Katsekehade purunemisajad jäid kõigil katsetustel planeeritud  $300 \pm 120$  sekundi sisse. Keskmiselt purunes sõrestikpost 311 sekundil. Puit-metall sõrestikpostide purustaval koormusel oli suur erinevus. Kõige nõrgem katsekeha purunes 5,59 kN juures, mis oli tingitud puidurikkest ogaplaatkinnituse all. Kõige tugevam sõrestikpost suutis vastu võtta koormust 8,30 kN ja keskmine koormus, mille juures katsekehad purunesid, oli 6,96 kN.

**Tabel 3.2.** Puit-metall sõrestikpostide maksimaalsed koormused ja purunemisviis

Katsekeha	Maksimaalne koormus, kN	Läbipaine, mm	Purunemisviis
SP-1	7,14	43,70	Puit-metall sõrestikpost küljest tulid parempoolsed ogaplaadid lahti. Üks tuli ülemise vöö küljest ja teine alumise vöö küljest
SP-2	8,30	39,29	Vasakpoolsed ogaplaadid tulid alumise $45 \times 45$ mm vöö küljest lahti
SP-3	7,28	31,64	Parempoolsed ogaplaadid tulid lahti. Üks ogaplaat tuli puit-metall sõrestikpost ülemise vöö küljest lahti ja teine alumise vöö küljest
SP-4	7,19	36,09	Puit-metall sõrestikpost parema poole pealt tuli ogaplaat alumise vöö küljest lahti
SP-5	6,26	27,4	Puit-metall sõrestikpost parema poole pealt tuli ogaplaat lahti ülemise vöö küljest
SP-6	5,59	23,63	Parempoolsed ogaplaadid tulid puit-metall sõrestikpost ülemise vöö küljest lahti. Tõenäoliselt tuli esimesena lahti ogaplaat, mis oli kinnitatud puidurikke kohapeale

Puit-metall sõrestikpostide paindekatsetest selgus, et määravaks ei saanud puidu tugevus, vaid nõrgaks kohaks osutusid vööde vahelised ogaplaatide kinnitused. Kõikide talade puhul toimus purunemine äärmiste ogaplaatide kinnituskohalt. Joonisel 3.1 on näidatud läbipainde muutus koormuse tõstmisel.



**Joonis 3.1.** Puit-metall sõrestikpostide läbipainde muutus koormusel

Jooniselt 3.1. on näha, et kõigil katsekehadel suurenes deformatsioon koormuse suurenemisel üpris sarnaselt. Kõige rohkem erines teistest deformatsiooni muutus koormamisel esimesel katsekehal, mille läbipaine hakkas erinema koormamise esimesel kolmandikul ja mille läbipaine jäi ka kõige suuremaks.

**Tabel 3.3.** Valemi 2.2.2. järgi arvutatud puit-metall sõrestikpostide paindejäikused 4 kN koormuse juures

Katsekeha	Paindejäikus, Nm <sup>2</sup>
SP-1	1,3961
SP-2	1,9301
SP-3	1,7665
SP-4	1,7274
SP-5	1,6798
SP-6	1,6233

Tabelis 3.3 on välja toodud sõrestikpostide paindejäikused, mis on arvutatud 4 kN koormuse juures. Arvutustest saadud tulemustest on näha, et puit-metall sõrestikpostide paindejäikused võivad erineda väga palju, kõige tugevam oli sõrestikpost number 2, mille paindejäikuseks oli 1,9301 Nmm<sup>2</sup> ja kõige nõrgemaks osutus sõrestikpost number 1, mille paindejäikus oli 1,3961 Nmm<sup>2</sup>. Puit-metall sõrestikpostide keskmiseks paindejäikuseks oli 1,687 Nmm<sup>2</sup>.



### 3.3 Seinapaneelide kandevõime määramine

Katsekehade purustamisel osutusid seinapaneelid oodatust palju tugevamaks. Oodatust suurem kandevõime oli põhjuseks, miks esimese katsekeha purunemine toimus nii palju hiljem eeldatavast purunemise ajast. Esimesel katsel toimus purunemine 540 sekundil. Arvestades, et paneel võttis kaks korda rohkem koormust vastu, siis sai otsustatud suurendada eeldatavat purunemisaega  $420 \pm 120$  sekundile. Lisaks esimesele katsetusele läks paneeli nr. 8 purunemine üle eeldatava aja, mis oli põhjustatud kõrvalistest asjaoludest, ning purunemine toimus 780 sekundil. Ülejäänud katsekehad jäid planeeritud aja sisse ja purunesid keskmiselt 423 sekundil. Tabelis 3.4 on välja toodud katsetustest saadud katsekehade purustavad koormused ja täpsed purunemiskohad on näidatud lisas 7 ning purunemispildid lisas 8.

Katsekehade purustamiseks kasutati surve ja painde koosmõju ning hoiti survejõudu kõigil komposiitementidel  $450 \pm 5$  kN juures, välja arvatud betoonpaneel, millele rakendati survejõudu 200,98 kN. Muudetavaks koormuseks oli kõigil juhtudel horisontaaljõud ja selle tõttu võrreldakse paneelide tugevust horisontaalkoormuse järgi.

Katsetustest selgus, et kõige suurema koormuse võttis vastu 8 mm armatuurvõrguga komposiitpaneel, mille maksimaalne horisontaalkoormus (edaspidi HK) oli 35,47 kN ja läbipaine 46,57 mm ning teise kahe purunemine toimus HK 32,07 kN ja 32,36 kN ning läbipained olid 40,51 mm ja 31,96 mm.

Komposiitmõju hindamiseks katsetati ka betoonpaneeli, millel puudus sõrestikraam paneeli välisküljel. Paneel nr. 1, mille puhul oli tegemist 6 mm võrguga armeeritud betoonpaneeliga, võttis vastu HK 14,93 kN ja läbipaine purunemisel oli 44,06 mm..

Seinapaneelid, mis olid armeeritud 6 mm võrguga, purunesid HK 32,86 kN ja 29,31 kN juures ning läbipained purunemisel olid vastavalt 29,69 mm ja 36,66 mm.

Komposiitementidest võttis kõige vähem koormust vastu kiudbetooniga komposiitpaneel, mis purunes koormusel HK 25,32 kN ja paindus läbi 32,77 mm. Antud juhul võis purunemine olla tingitud sellest, et ogaplaat oli kinnitatud puidurikke kohale. Teise kahe kiudbetoonist komposiitementi purunemine toimus samal HK 32 kN ning läbipained olid vastavalt 36,99 mm ja 32,77 mm. Tabelis 3.5 on näidatud seinapaneelide keskmised horisontaalkoormused purunemisel.

**Tabel 3.4.** Seinapaneelide maksimaalsed koormused, läbipained ja purunemisviisid

<b>Katsekeha</b>	<b>Maks. koormus F1, kN</b>	<b>Maks. koormus F2, kN</b>	<b>Läbipaine, mm</b>	<b>Purunemisviis</b>
Paneel nr. 1 (Betoon-paneel)	200,98	14,93	44,06	Betoelement kaotas kandevõime tõmbele, välispinnale tekkisid praod
Paneel nr. 2	451,77	32,86	29,69	Keskmise sõrestikposti ülemised ogaplaadid tuli 45×45 mm vöö küljest lahti, mille tagajärjel kaotas betoon kandevõime tõmbele ja betooni välispinnale tekkisid praod
Paneel nr. 3	449,76	29,31	36,66	Keskmise sõrestikposti 70×45 mm vöö purunes kesktelt nihkeankru juures oleva puidurikke kohalt, mille tagajärjel kaotas betoon kandevõime tõmbele ja välispinnale tekkisid praod
Paneel nr. 4	448,06	32,07	40,51	Keskmise sõrestikposti kinnitid andsid järgi, mille tulemusel sõrestikpost eemaldus betoonpladist ja betooni pinnale tekkisid praod ning betoon kaotas kandevõime tõmbele
Paneel nr. 5	445,84	35,47	46,57	Vasakpoolse sõrestikposti 70×45 mm vöö purunes kesktelt nihkeankru juurest tõmbele, mille tulemusena kaotas betoon tõmbekandevõime ja välisküljele tekkisid praod
Paneel nr. 6	450,71	32,36	31,96	Parempoolse sõrestikposti ülemine ogaplaat tuli 45×45 mm vöö küljest lahti, mille tulemusena andis sõrestikpost järgi ja betoon ei suutnud enam tõmbepinget vastu võtta ning välispinnale tekkisid praod
Paneel nr. 7	452,2	32,36	36,99	Keskmise sõrestikposti 70×45 mm vöö purunes tõmbele keskmise nihkeankru juurest, mille tulemusena kaotas betoon kandevõime ja tekkisid praod välispinnale
Paneel nr. 8	449,33	25,32	32,77	Vasakpoolse sõrestikposti ülemised ogaplaadid tulid 45×45 mm vöö küljest lahti, mille tulemusena kaotas betoonplaat kandevõime ja välispinnale tekkisid praod
Paneel nr. 9	451,14	32,12	29,85	Vasakpoolse sõrestikposti ülemised ogaplaadid tulid vööde küljest lahti, mille tulemusena kaotas betoonplaat tõmbekandevõime ja välispinnale tekkisid praod

**Tabel 3.5.** Seinapaneelide keskmised horisontaalkoormused purunemisel

Armeering	Keskmine HK, kN
8 mm	33,30
6 mm	31,09
Kiudbetoon	29,93

Märkus. HK tähendab horisontaalkoormust

Paneelide läbipainded erinesid oluliselt: kõige väiksem läbipaine oli 29,69 mm (6 mm armatuuriga) ja kõige suurem oli 46,57 mm (8 mm armatuuriga). Tabelis 3.6 on välja toodud keskmised läbipainded seinapaneelide purunemisel.

**Tabel 3.6.** Seinapaneelide keskmised läbipainded purunemisel.

Armeering	Keskmine läbipaine, kN
8 mm	39,68
6 mm	36,80
Kiudbetoon	33,20

Kuigi sarnaseid katsekehi ja oli liiga vähe, et lõplikke järeldusi teha, näitasid teostatud katsed, et puit-metall sõrestikraam vähendas sarnase betoonpaneeli läbipainet neljandiku võrra.

Komposiit-seinaelementide purunemine toimus kõige sagedamini puit-metall sõrestikposti ogaplaatide kinnituste purunemise tõttu, mis tulid enamjaolt lahti 45×45 vöö küljest. Purunemist esines ka paneelide keskmise sõrestikposti 70×45 vöös, mis purunes tõmbele keskmise ogaplaatkinnituse juures. Ühel juhul oli seda kohta nõrgestanud puidus olev oksakoht. Peale sõrestikposti purunemist kaotas betoonplaat oma kandevõime ja betoonplaadi tõmbetsooni tekkisid praod.

Lisas 9 olevatel diagrammidel on näidatud, kuidas muutub katsekehade läbipaine ajas sõltuvalt rakendatud koormustest. Diagrammidelt selgub, et vertikaalse survejõu rakendamine ei avalda seinapaneelide läbipaindele märkimisväärset mõju, samas kui horisontaalsuunalise põikkoormuse koormuse mõjutab seda otseselt. Tabelis 3.7 on võrdlevalt välja toodud katsekehade läbipainded sarnase koormuskombinatsiooni juures.

**Tabel 3.7.** Seinapaneelide läbipainded sama koormuskombinatsiooni juures.

Katsekeha	F1, kN	F2, kN	Läbipaine, mm
Paneel nr. 1	200,98	14,93	44,06
Paneel nr. 2	203,54	14,78	8,06
Paneel nr. 3	199,70	15,02	10,09
Paneel nr. 4	202,18	14,83	7,81
Paneel nr. 5	205,68	14,78	9,49
Paneel nr. 6	207,12	14,83	6,95
Paneel nr. 7	208,93	14,83	9,34
Paneel nr. 8	202,78	14,88	14,62
Paneel nr. 9	209,11	14,73	6,38

Tabelist 3.7 võib näha, et seinaelementide läbipainded on väga erinevad ja seega võib järeldada, et seinapaneelide tugevus oleneb suuresti paneeli valmistamise ja materjali kvaliteedist. Sarnaste katsekehade võrdluses on näha, et sama armeeringuga paneelide läbipainded erinevad oluliselt: kõige suurema ja väiksema läbipaindega katsekehad antud koormuskombinatsiooni juures olid kiudbetoonist komposiitelemendid, mille puhul kõige suurem läbipaine oli 14,62 mm ja kõige väiksem läbipaine 6,38 mm, mis on peaaegu kaks korda väiksem. Keskmise läbipainde võrdluses olid kõige väiksema läbipaindega 8 mm armatuurvõrguga seinaelemendid, mille keskmine läbipaine oli 8,08 mm, seejärel 6 mm armatuurvõrguga seinapaneelid (9,08 mm) ning kõige suurem läbipaine oli kiudbetoonist seinaelementidel, mille keskmine läbipaine oli 10,11 mm.

Seinapaneelide ja betoonpaneeli katsete võrdlusest on näha, et betoonpaneel paindus antud koormuse juures 44,06 mm aga sarnase betoonplaadiga komposiitpaneeli läbipaine oli keskmiselt 9,08 mm, mis on ~4,9 korda väiksem. Siit võib järeldada, et Posi postidest raami sidumine betoonpaneelile ja tekkiv komposiitmõju vähendab oluliselt konstruktsiooni läbipainet.

Ehituskonstruktori käsiraamatu järgi on soovitulik maksimaalne horisontaalsiire ühe korruse ulatuses  $H/300$  (Masso, et al., 2014). Antud seinapaneelide puhul on lubatud läbipaine koondatud põikkoormusest  $2700/300 = 9$  mm. Tabelis 3.7 esitatud koormuste korral on puitbetoon seinapaneelide läbipainded suuremal osal kas alla 9 mm või selle juures. Tabelis 3.7 on põikkoormus pinnaühikule ~4,6 kN/m<sup>2</sup>, mis on oluliselt suurem, kui normidekohased hoonetele rakendatavad tuulekoormused. Katsetulemustest oli näha, et seinapaneelide läbipaine tekkis põhiliselt põikkoormusest (lisa 9), seega võib eeldada, et reaalses konstruktsioonis seinapaneelidel sama vertikaalkoormuse juures nii suuri läbipaindeid ei teki.

Eeltoodut ning tabelites 3.4 ja 4.3 välja toodud tulemusi arvesse võttes võib järeldada, et komposiitpaneelid võtavad vastu piisavalt suuri vertikaalkoormusi ja antud lõputöös kasutatud paneelid sobivad 1-2 korruseliste hoonete ehitamiseks, sõltuvalt lagede silletest ja koormustest. Katsetatud komposiitsed seinapaneelid võiksid kande- ja kasutuspiirseisundite nõuete rahuldamisel sobida ka kuni 3-4 korruseliste eluhoonete ehitamisel. Selle täpsemaks hindamiseks tuleks teha veel täiendavaid uuringuid.

## 4 KATSETUSTEST JA TEOREETILISTEST ARVUTUSTEST SAADUD TULEMUSTE VÕRDLUS JA ANALÜÜS

### 4.1 Posi postide katsetulemustest ja teoreetilistest arvutustest määratud tulemuste võrdlus ja analüüs

Posi postide teoreetiliste läbipainete arvutamiseks silde keskel rakendatud koondatud jõust kasutati 4 erinevat meetodit. Arvutuslike läbipainete leidmiseks käsitleti esiteks Posi posti kui täisseinalist tala, jättes arvestamata seina paindejäikuse selle hüljatava mõju tõttu, ning teise variandina arvutati posti vööd paindel eraldi töötavatena. Arvutused on esitatud lisas 10. Posi läbipainete määramiseks lõplike elementide meetodil kasutati programmi Taricad, mille puhul kasutati kahte arvutusskeemi. Ühel juhul kasutati diagonaalidel liigendsõlmi ja teise variandina olid diagonaalid jäikade sõlmedega. Programmis Taricad kasutatud arvutusskeemid ühikkoormusega ja vastavad sisejõudude ja läbipainete epüürid on näidatud lisas 11. Selleks, et võrrelda teoreetiliselt saadud tulemust ja katsetulemust korrutati ühikkoormuse järgi arvutatud tulemused läbi rakendatava koormusega. Kõigi meetodite puhul võeti mõjuvaks koormuseks 4 kN. Kõigi teoreetiliste meetoditega arvutatud läbipainded on esitatud tabelis 4.1.

**Tabel 4.1.** Teoreetiliste meetoditel saadud Posi postide läbipainded

Meetod	Koormus, kN	Läbipaine, mm
Täisseinaline tala (arvestamata seina paindejäikust)	4	6,26
Paindel eraldi töötavate vöödega tala	4	131,5
Taricad (diagonaalid liigendsõlmedega)	4	9,44
Taricad (diagonaalid jäikade sõlmedega)	4	8,64

**Tabel 4.2.** Läbipaine katsetulemustest koormusel 4 kN

Katsekeha	Läbipaine, mm
SP-1	16,84
SP-2	12,02
SP-3	13,33
SP-4	13,64
SP-5	13,94
SP-6	14,50

Märkus. Tabeli läbipainded on katsegraafikutelt interpoleeritud koormusele 4 kN.

Katsetulemustest selgus, et kõige väiksem läbipaine 4 kN juures oli 12,02 mm ja kõige suurem oli 16,84 mm. Kõigi katsete keskmine läbipaine antud koormuse juures oli 14,05 mm.

Teoreetilistest meetoditest oli kõige lähedasemad katselistele tulemustele programmiga Taricad saadud läbipainete väärtused. Võttes aluseks katsetest määratud suurima läbipainde, on väikseim erinevus katselise ja teoreetilise tulemuse vahel olukorras, kus diagonaalidel oli kasutatud liigendtugesid ja saadud läbipaine oli 9,44 mm, mis on 7,40 mm võrra väiksem, kui oli tehtud katsete kõige suurem läbipaine. Taricadi arvutuse teises variandis, kus diagonaalid olid jäikade sõlmedega, oli tulemuseks 8,64 mm. Selle puhul oli tulemus ligi kaks korda väiksem, võrreldes katsest saaduga. Kõige väiksema läbipainde andis täisseinalise tala arvutusmeetod, mis andis 10,58 mm väiksema tulemuse ja läbipaindeks saadi 6,26 mm. Ainus meetod, mis andis tegelikkusest suurema läbipainde oli paindes eraldi töötavad vööd, mille puhul oli tulemus 114,66 mm suurem ehk läbipaindeks oli 131,50 mm. Tegelikuses on puit-metallsõrestiku korral tegemist järeleandvate sõlmedega ning reaalsed tulemused peaksid jääma kahe variandi vahele. Seda kinnitavad ka katsetulemused.

Praeguste katsetuste ja teoreetilisel teel saadud tulemuste võrdluses võib järeldada, et antud tala läbipainde määramiseks ükski neist meetoditest otseselt ei sobi. Katseandmete põhjal määratud sõrestikpostide paindejäikusi on seevastu võimalik kasutada täpsemate läbipainete arvutustulemuste saamiseks.

## 4.2 Puit-betoon komposiitlementide katsetulemuste ja teoreetiliste arvutustega saadud tulemuste võrdlus ja analüüs

### 4.2.1 Puit-betoon seinapaneelide läbipaine

Puit-betoon komposiitlementi arvutusliku läbipaine määramiseks kasutati programmi Taricad. Programmi sisestati 1/3 paneeli laiune element koos jäikade sõlmedega Posi postiga. Antud paneelile anti koormused vertikaalselt 150 kN ja horisontaalselt 10 kN ehk kogu paneelile mõjuvad koormused 450 kN ja 30 kN. Paneeli katseskeem ja epüürid on näidatud lisas 12.

Katselise ja arvutusliku läbipainde võrdlemiseks valiti koormuskombinatsioon, kus vertikaalkoormus oli 450 kN ja horisontaalkoormus 25 kN kuna antud koormuse juures olid kõigil katsekehadel andmed olemas ja antud koormus pole purunemise piiri ligidal, välja arvatud paneel nr. 8, mille puhul toimus sellel koormusel ka purunemine. Purunemine oli tõenäoliselt tingitud ogaplaadi kinnitumisest puidurikkele. Selleks, et viia lisas 12 olevad tulemused vastavusse sama kombinatsiooniga tuli paneeli sisejõud ja läbipainded korrutada läbi koormuse väärtusega ( $3 \times F_2/10$ ). Selle koormuskombinatsiooni juures tuli arvutuslikuks läbipaindeks 35,1 mm ja tabelis 4.3 on välja toodud katselised tulemused.

**Tabel 4.3.** Läbipainded koormuskombinatsiooni juures, kus  $F_1 \approx 450$  kN ja  $F_2 \approx 25$  kN

Katsekeha	F1, kN	F2, kN	Läbipaine, mm
Paneel nr. 2	450,92	25,62	11,20
Paneel nr. 3	451,67	25,62	17,06
Paneel nr. 4	450,71	25,71	13,87
Paneel nr. 5	450,39	25,42	13,49
Paneel nr. 6	450,29	25,27	12,64
Paneel nr. 7	451,88	24,98	14,48
Paneel nr. 8	449,33	25,32	32,77
Paneel nr. 9	451,67	24,58	10,66

Seinapaneelide katseliselt saadud tulemuste keskmine läbipaine tabelis 4.3 välja toodud koormuste juures oli 15,77 mm, mida tõstis märgatavalt paneel nr. 8, selle läbipaine oli 32,77 mm ja suuruselt järgmine oli 17,06 mm ning kõige väiksema läbipaine oli 10,66 mm.

Antud koormuste puhul on arvutuslik läbipaine (35,1 mm) suurem, kui kõik katselised tulemused. Kõige suuremast läbipaindest on 2,33 mm suurem aga järgmisega on erinevus



juba 18,04 mm. Nendest tulemustest võib järeldada, et antud arvutusmeetod annab hea tuleme. Samamoodi jäävad katselised läbipained väiksemaks kui minna teoreetiline läbipaine määramisel purunemiskoormusele lähemale. Vertikaalkoormusel 32 kN on arvutuslik läbipaine 44,93 mm ja kõige suurem katseline tulemus on näha tabelis 3.4 ning selleks on 40,51 mm. Paneeli nr. 5 läbipaine sellel koormusel on 31,25 mm.

#### **4.2.2 Puit-betoon seinapaneelide kandevõime**

Lõplike elementide meetodi põhjal tehtud komposiitpaneelide purustava põikkoormuse arvutamiseks võeti aluseks lisas 11 ja 12 olevad pikijõu epüürid ning Posi sõrestikpostide paindekatses kõige nõrgem tala, mis purunes koormusel 5,59 kN. Arvutuskäik on näidatud lisas 13. Arvutuse põhjal peaks seinapaneel purunema 37,6 kN juures ja purunemine peaks toimuma sõrestikposti sisemises surutud vöös mõõtudega 70×45 mm.

Katsetulemustest selgus, et paneeli purunemine toimus koormuste 25,3-35,5 kN vahel ja keskmine purunemine toimus koormusel 31,48 kN. Need koormused olid kõik väiksemad, kui arvutuslik tulemus (37,6 kN), mis tähendab, et tegelikkuses ei tööta komposiitpaneeli kõik osad nii ideaalselt, kui eeldatakse arvutiprogrammi kasutamisel. Paneeli ja sõrestikposti nihkeliites ja sõrestiku sõlmedes on järeleandlikud ogaplaatkinnitused, mis tegelikkuses vähendavad komposiitpaneeli kandevõimet. Paneelide paindekatses osutusidki need kõigi katsetuste puhul kõige nõrgemaks kohaks. Kandevõime katsetes andsid järgi 2/3 paneelidel ogaplaatide kinnitused aga 1/3 juhtudest purunes paneeli keskmine sisemine vöö sõrestikposti keskelt nihkeankru juurest. Paneelid, kus purunes sisemine vöö kaotasid kandevõime põikkoormusel 29,31 kN, 35,47 kN ja 32,36 kN, mis olid arvutuslikust purunemise koormusest 8,29 - 2,13 kN nõrgemad.

Seega leiab kinnitust, et teoreetilised arvutustulemused erinevad katsetulemustest (tegelikest väärtustest) läbipainete ja kandevõimete osas seetõttu, et arvutusskeem on tinglik ning ei arvesta ogaplaatliidete järeleandlikkust.

Analüütiliste meetoditega kontrollarvutuste sooritamine ei ole otstarbekas, sest käesoleval juhul ei ole puit-metallsõrestiku (Posi posti) puhul tegemist klassikalise talaga ega ka

sõrestikuga ning tulemused kehtiksid ainult konkreetse juhtumi jaoks. Seetõttu on tulemuste hindamiseks sobivam ja ratsionaalsem kasutada siiski lõplike elementide meetodit.

## KOKKUVÕTE

Antud magistritöös tehti kolme liiki katseid. Peamiseks eesmärgiks oli määrata katseliselt puit-betoon komposiit-seinapaneelide kandevõime ja läbipainded. Lisaks seinapaneelidele katsetustele tehti kuubikujuliste betoonist katsekehadele survekatsed ja puit-metall sõrestikpostide paindekatsed, mille põhjal kontrolliti betooni survetugevust ja määrati puit-metall sõrestikpostide paindejäikus.

Eelpool toodud eesmärkide saavutamiseks koostati katsemetoodika katsekehade koormamiseks ja läbipainde mõõtmiseks. Seinapaneelide ja puit-metall sõrestikpostide paindekatsete teostamine toimus Eesti Maaülikooli maaehituse osakonna ehituskonstruksioonide laboris. Puit-betoon seinapaneelide koormamiseks kasutati kahte survesilindrit, millest üks oli kinnitatud jõuseina küljes asetsevale raamile ja teine toetus puitraamile seina ja paneeli vahel. Seinapaneelidega tehti kokku 9 katset ja koormust tõsteti nii, et katsekehade purunemine jääks vahemikku  $420 \pm 120$  sekundit.

Sõrestikpostide koormamine toimus ühe survesilindriga, mille koormus jaotati tala kahele punktile. Posi taladega tehti kokku paindekatsed 6 katsekehaga, mille koormamisel tõsteti koormust ühtlaselt nii, et purunemine toimuks  $300 \pm 120$  sekundit.

Betoonist kuubikute survekatsed toimusid Eesti Maaülikooli maaehituse osakonna ehitusmaterjalide laboris. Betooni survetugevust kontrolliti 5 katsekehaga, millest 3 oli tavalisest betoonist ja 2 kiudbetoonist. Katsetulemustest selgus, et kiudbetoonist kuubikuliste katsekehade tugevusklass oli C25/30 ja tavalise betooni tugevusklass oli C30/37.

Puit-metall sõrestikpostide paindekatsesest selgus, et talade puhul ei saanud määravaks puidu tugevus vaid kriitiliseks osutus ogaplaatide kinnitus puidu külge. Keskmine koormus, mida sõrestikpostid paindekatses vastu võtsid oli 6,96 kN.

Võrreldes teoreetiliselt saadud läbipainet ja katsetest saadud tulemusi põikkoormusel 4 kN selgub, et erinevate meetoditega teoreetiline arvutus andis läbipaineteks 9,44 mm, 8,64 mm ja 626 mm ja 131,5 mm. Katsetes oli keskmine läbipaine sama koormuse juures 14,32 mm

ja kõige suurem läbipaine 16,84 mm, mis on 1,8-2,7 korda suurem, kui esimese kolme meetodiga saadud tulemused.

Puit-betoon seinapaneelide kandevõime määrati katsetes ekstsentrilisel surveel, kus rakendati konstantne vertikaalne survejõud ja paneeli keskel muutuv põikkoormus. Võrdluseks katsetati ka eraldi ühte betoonpaneeli.

Ühtlasel koormusel võrreldud läbipainded näitasid, et puit-metall sõrestikraam vähendas seina läbipainet oluliselt. Ilma Posi postideta seinapaneel paindus läbi 44,06 mm ja sama armeeringuga paneelid, mis olid koos raamiga, nende keskmine läbipaine oli 9,08 mm, mis on 4,8 korda väiksem. See tulemus kinnitab puit-betoon komposiitpaneeli suuremat tugevust ja jäikust.

Sooritatud katsetes mõjutas seinapaneelide läbipaindeid põhiliselt horisontaalkoormus, sest survejõud oli muutumatu. Katsekehade läbipainete võrdluses ühtlase koormuse juures selgus, et kõige tugevam seinapaneel oli 8 mm armatuurvõrguga, millele järgnes 6 mm armatuurvõrguga katsekehad ja kõige suurema keskmise läbipaindega olid kiudbetoonist seinaelemendid.

Posi seinapaneelide läbipainde arvutus andis tulemuseks, et paneel paindub maksimaalselt läbi 35,1 mm, mis oli hea tulemus kuna kõik katsekehad olid väiksema läbipaindega. Kõige lähedasem läbipaine katsetustes oli 32,77 mm ja sellele suuruselt järgnes 17,06 mm. Kahe kõige suurema läbipaindega katsekeha suur erinevus oli tingitud sellest, et ühe katsekeha ogaplaat oli kinnitatud puidurikke kohale, mis nõrgestas konstruktsiooni. Kõige väiksem läbipaine oli 10,66 mm.

Ekstsentrilisel surveel töötavate puit-betoon komposiitpaneelide purustava põikkoormuse arvutuslikuks tulemuseks lõplike elementide meetodiga saadi 37,6 kN. Seinapaneelide tegelik purunemine toimus pisut väiksemal koormusel, kuid arvutuskäik annab siiski ligikaudu sama tulemuse ja sobib katsekoormuste esialgseks hindamiseks. Tegelik purustav põikkoormus katsetes oli 25,3 kN ja 35,5 kN vahel.

Posi postide ja seinapaneelide katsetustest selgus, et konstruktsiooni tugevust mõjutavad oluliselt puidurikke. Puidurikete vältimisega Posi sõrestikpostides saaks tõsta paneelide üldist kvaliteeti ja suurendada kandevõimet.

Puit-betoon komposiit-seinapaneelid võimaldavad kasutada ökonoomsemaid lahendusi hoonete soojustatud kandvate seinte rajamisel. Edasistes uurimustes tuleks keskenduda konstruktsioonide sõlmede, eriti ogaplaatühenduste uurimisele.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- Bathon, L. A., Bletz, O., & Schmidt, j. (2006). Hurricane proof buildings- An innovative solution using prefabricated modular wood-concrete.composite elements. *9th World Conf. on Timber Engineering* (lk 8). Portland: WCTE.
- Betoon. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus. (2016). *EVS-EN 206:2013+AI:2016*. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- Betooni katsetamine Osa 3: Katsekehade survetugevus. (2009). *EVS-EN 12390-3:2009*. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- Chuan, D. Y. (2010). *Behaviour and design of timber-concrete composite floor system*. Christchurch: University of Canterbury.
- ConcreTech, O. (1. veebruar 2017. a.). *madala energiatarbega hoone piirete toote- ja tehnoloogia-arendus*. Allikas: TimBeti veebisait: <http://www.timbet.eu>
- Costa, L. (2011). *Timber concrete composite floors with prefabrivate Fiber Reinforced Concrete*. Lund: Lund Institute of Technology.
- Destro, R., Boscato, G., Mazzali, U., Russo, S., Perno, S., & Romagnoni, P. (2015). Structural and thermal behaviour of a timber-concrete prefabricated composite wall system. *Energy Procedia*, 2730-2735.
- Eestipuitmajaehitus. (26. Märts 2017. a.). *Eesti Puitmaja Ehitus OÜ*. Allikas: Eesti Puitmaja Ehitus veebileht: <http://eestipuitmaja.ee>
- Ehitisele esitatavad tuleohutusnõuded, Lisa 2*. (2015). Tallinn: Majandus ja taristuminister.
- Ehituspuit. (2016). *EVS-EN 338:2016*. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- Girhammar, U. A. (1984). Composite tiber and concrete components for wall. *IABSE 12 Congress*, (lk 7). Vancouver.
- Hassan, O. A., Schedin, S., & Girhammar, U. A. (2012). Experimental analysis of composite timber-concrete wall element. *European conference on composite materials* (lk 8). Venice: ECCM15.
- Ilmet, K. (2006). *Puuteadus*. Tartu: Eesti Metsaselts.
- Linden, M. V. (1999). Timber-concrete composite beams. *HERON*, 215-239.
- Lukaszewska, E. (2009). *Development of Prefabricated Timber-Concrete Composite Floors*. Lulea: Lulea University of Technology.
- Martins, C., Dias, A. M., Costa, R., & Santos, P. (2015). *Enviromentally friendly high performance timber-concrete panel*. Coimbra: Elsevier.

- Martins, C., Santos, P., Almeida, P., Godinho, L., & Alfredo, D. (2015). Acoustic performance of timber and timber-concrete floors. *Construction and Building Materials*, 684-691.
- Masso, T., Rohusaar, J., Mägi, R., Talvik, I., Jaaniso, V., Otsmaa, V., . . . Hartšuk, V. (2014). *Ehituskonstruktori käisraamat*. Tallinn: Autorid ja EHITAME kirjastus.
- Miotto, J. L., & Dias, A. A. (2015). Structural efficiency of full-scale timber-concrete composite beams strengthened with fiberglass reinforced polymer. *Composite Structures*, 145-154.
- MiTeK. (1. Aprill 2017. a.). *MiTek Industries LTD*. Allikas: MiTek Industries LTD veebileht: <http://www.mii.com/site/frameset.aspx?siteid=13&langid=2057&main=http%3A%2F%2Fwww.mii.com%2Fpage%2Fopen.asp%3Fpid%3D10077>
- MiTek Industrial AB. (2013). MiTek GNT100S Connector plate. *Declaration of performance*, 2. MiTek.
- MiTek Industrial AB. (2013). Declaration of performance. *MiTek TOP-W Connector plate*. MiTek.
- MiTek Industrial AB. (8. Aprill 2017. a.). *Mitek Industrial*. Allikas: Miteki koduleht: <http://www.mitek.fi/Tuotteet/Naulalevyt/Top-W/>
- MiTek Industrial AB. (6. Aprill 2017. a.). *MiTek Industrial*. Allikas: Miteki koduleht: <http://www.mitekab.se/wp-content/uploads/2015/08/spikplat-skiss.jpg>
- Natterer, J. k. (2002). New technologies for engineered timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 245-263.
- Otsmaa, V., Pello, J., & Sooru, K. (2014). *Betoonkonstruktsioonide arvutamine*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool ja Eesti Betooniühing.
- Otsus, M. (2013). *Posi-talade ja puit-betoon komposiitpaneelide katsetused ning analüüs (Magistritöö)*. Tartu: Eesti maaülikooli metsandus- ja maaehitus instituut.
- Pihlapson, P. (2015). *Puit-metall sõrestikpostide ja puit-betoon komposiit seinapaneelide katsetused ja analüüs (Magistritöö)*. Tartu: Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehituse instituut.
- Rijal, R., Samali, B., Crews, K., & Shrestha, R. (2010). Dynamic behaviour of timber-concrete composite flooring systems. *World conference on timber engineering* (lk 1-6). Trentino: WCTE.
- Schnabl, S., Planinc, I., & Turk, G. (2013). Buckling Loads of Two-Layer Composite Columns with Interlayer Slip and Stochastic Material Properties. *Journal of Engineering Mechanics*, 961-967.
- TimBet, O. (28. veebruar 2017. a.). *TimBet*. Allikas: TimBeti veebisait: [www.timbet.eu](http://www.timbet.eu)
- Valgur, J. (2014). *Raudbetoonkonstruktsioonid I*. Tartu: Loengukonspekt.
- Õiger, K. (2006). Puidust, puidupõhised ja teistest materjalidest komposiitkonstruktsioonid. *Puuinfo* 2/2016, 41.

# **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF LOAD BEARING CAPACITY OF COMPOSITE TIMBER AND CONCRETE WALL ELEMENT „Timbet”**

## **SUMMARY**

Concrete has been one of the most used building materials in modern construction, but it is heavy and this has led people to look for alternative solutions in order to make a light but strong structure. One of the alternatives is composite concrete and timber, which are mostly used in floor and bridge construction but nowadays constructors have started to use the same technique in wall elements also. In this way concrete walls can be thinner but at the same time stronger and lighter.

The aim of this thesis was to determine the load capacity of timber-concrete composite wall elements, compare wall elements, which have different reinforcement, and compare experimental results with calculations. Also, in this work bending tests were carried out with timber-metal lattice girders, which were similar to those used in wall elements.

Experiments were made in the construction laboratory of the Estonian University of Life Sciences. Test methodology was made in order to measure loading and deformations in elements. Bending tests were done with 6 timber-metal lattice girders and deformations were measured in the middle of the elements. Load capacity experiments were made with 3 different reinforcements. To reinforce the concrete, 6 mm and 8 mm thick reinforced steel bars and steel fibers were used. In this experiment 9 specimens were tested and there were 3 elements of kind with similar reinforcement. One of the samples with a 6 mm reinforced steel bar was tested without lattice girders. The loads were applied to the test elements with single acting cylinders Lukas LZM 25-200 and Rehobot CFA 750-200. In wall element tests, load combinations were used where the vertical load was 450 kN and the horizontal load was variable. Different was element without lattice girders, there was vertical load 200 kN. Only the element without lattice girders was different - there, the vertical load was 200 kN.

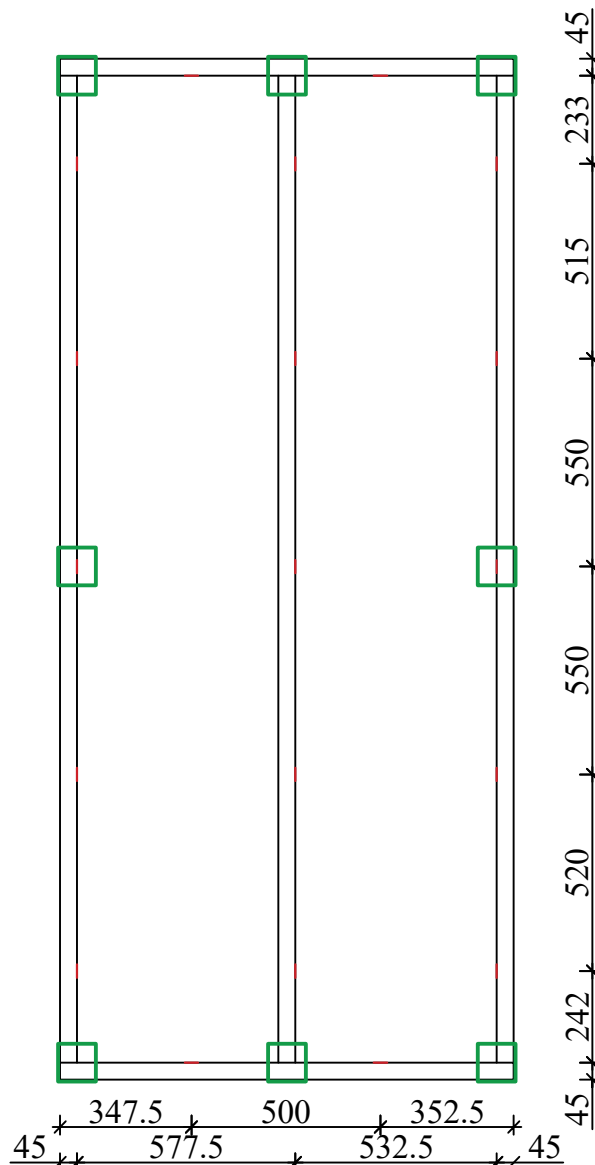


The bending test's results showed that the average Posi lattice girder's bending strength was 6.96 kN. The strongest element lost capacity with 8.30 kN and the weakest shattered on 5.59 kN. Calculations, which were used in this thesis to determine the sag of the lattice girders, did not give acceptable results.

Results from load capacity experiments showed that timber-concrete composite wall elements with a 8 mm reinforce steel bar were the strongest and shattered with an average load of 33,27 kN, next were 6 mm thick reinforce steel bars with an average of 31,09 kN and the weakest ones were fiber-reinforced with average 29,33 kN. When comparing elements with 6 mm reinforced steel, where one of the samples does not have lattice girders and other two do, then the sag on similar loading was 4.8 times smaller when you add lattice girders. The sag calculation gave in this case good results – calculation gave sag of 44.93 mm on a load of 32 kN and all experimental results on the same load were smaller. Second calculation was made to compare element load capacity and in this case theoretical result was bigger than the experimental tests showed.

**LISAD**

# Lisa 1. Betoonikihi paksuse mõõtmistulemused ja ogaplaatide asukohad



## Eksplikatsioon:

- Ogaplaat
- Mõõtmiskoht

## Betonplaadi paksuse mõõtmise tulemused

Katsekeha nr.	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	5 (mm)	6 (mm)	7 (mm)	8 (mm)
Paneel nr. 1	81	81	82	81	78	77	79	82
Paneel nr. 2	85	84	82	81	81	81	81	81
Paneel nr. 3	82	84	81	83	84	80	82	81
Paneel nr. 4	78	80	82	82	85	85	85	80
Paneel nr. 5	80	83	81	83	85	83	84	84
Paneel nr. 6	83	81	79	83	82	82	83	81
Paneel nr. 7	83	81	82	86	89	90	91	80
Paneel nr. 8	81	82	83	83	85	83	85	82
Paneel nr. 9	80	78	80	83	90	90	85	82

Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa

Projekti nimetus:

Magistritöö

Projekti nr: M-1

Objekti aadress:

Staadium:

Joonestas: Jakob Goroško

19.05.2017

Objekti nimetus:

osa:

Juhendas: J. Valgur, V.Pallav

Katsekehade joonised

Alajaotus: Lisa



**Eesti Maaülikool**  
Estonian University of Life Sciences  
Metsandus- ja maaehitusinstituut  
Institute of Forestry and Rural Engineering

Maaehituse osakond  
Department of Rural Building

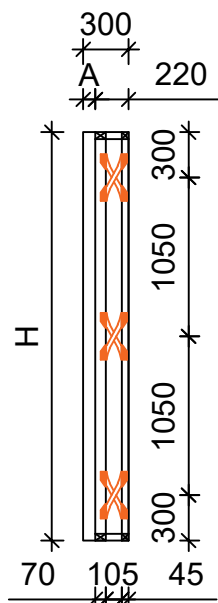
Mõõtkava: M 1:20  
Lehti: 1  
Formaat: A4

Magistritöö.dwg

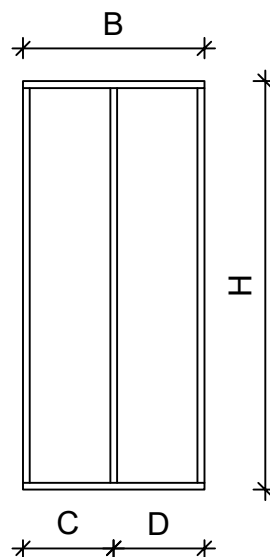
Joonise nimetus:  
Betonplaadi mõõtmistulemused ja ogaplaatide asukohad

## Lisa 2. Katsekehade mõõtmiste tulemused

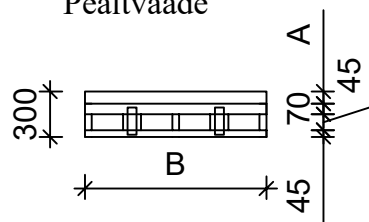
Külgvaade




Eestvaade



Pealtvaade



Katsekeha nr.	Armatuur	Silm/kogus	A (mm)	H (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
Paneel nr. 1	6 mm	170x160mm	81,1	2700	1201	585	616
Paneel nr. 2	6 mm	170x160mm	83,9	2699	1202	588	614
Paneel nr. 3	6 mm	170x160mm	82,1	2701	1199	587	612
Paneel nr. 4	8 mm	170x160mm	82,1	2701	1197	584	613
Paneel nr. 5	8 mm	170x160mm	82,9	2700	1198	587	611
Paneel nr. 6	8 mm	170x160mm	81,8	2701	1199	589	610
Paneel nr. 7	Kiud	25 kg/m <sup>3</sup>	84,3	2700	1198	586	612
Paneel nr. 8	Kiud	25 kg/m <sup>3</sup>	83,0	2700	1200	584	616
Paneel nr. 9	Kiud	25 kg/m <sup>3</sup>	82,9	2701	1201	585	616

Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus: <b>Magistritöö</b>			Projekti nr: <b>M-1</b>	
Objekti aadress:						Staadium:	
Joonestas:	Jakob Goroško		19.05.2017	Objekti nimetus: <b>Katsekehade joonised</b>			osa:
Juhendas:	J. Valgur, V.Pallav						Alajaotus: <b>Lisa</b>
 <b>Eesti Maaülikool</b> Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering				Mõõtkava: <b>M 1:50</b>		Joonise nimetus: <b>Katsekehade mõõtmise tulemused</b>	
				Lehti: <b>1</b>	Lehti: <b>1</b>		
				Formaat: <b>A4</b>	Fail: <b>Magistritöö.dwg</b>		

### **Lisa 3. Ajutine konstruktsioon siirdeandurite paigaldamiseks**



**Joonis L3.1** Siirdeandurite süsteem

#### **Lisa 4. Betoonest kuubikujuliste katsekehade purunemispildid**



**Joonis L4.1.** Kuup nr. 1 purunemispilt



**Joonis L4.2.** Kuup nr. 2 purunemispilt



**Joonis L4.3.** Kuup nr. 3 purunemispilt



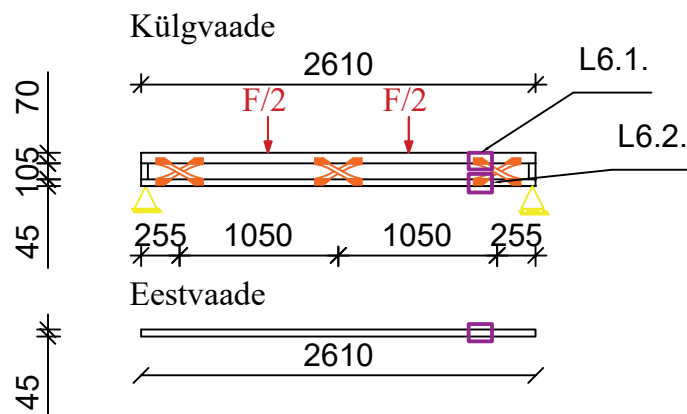
**Joonis L4.4.** Kuup nr.4 purunemispilt



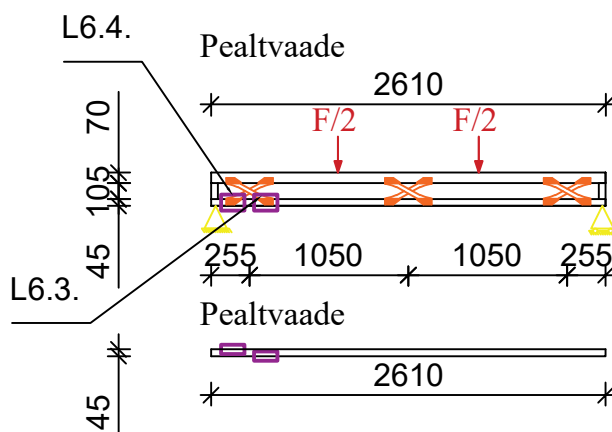
**Joonis L4.5.** Kuup nr. 5 purunemispilt

## Lisa 5. Puit-metall sõrestiktalade purunemiskohad

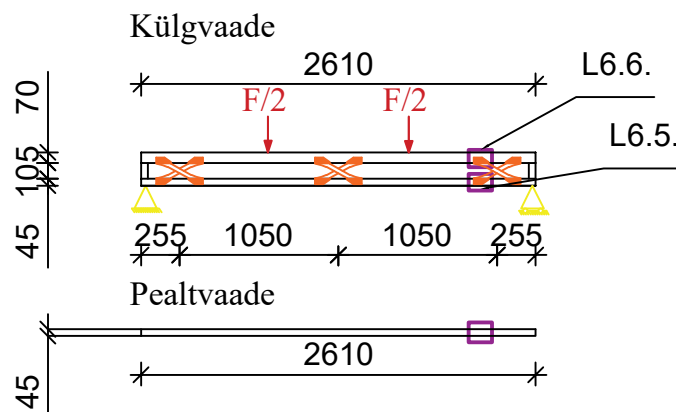
Puit-metall sõrestiktala nr. 1



Puit-metall sõrestiktala nr. 2



Puit-metall sõrestiktala nr. 3



### Märkused:

Antud töös viitab Joonis L6.X. lisa 6 oleva purunemispildi joonisele

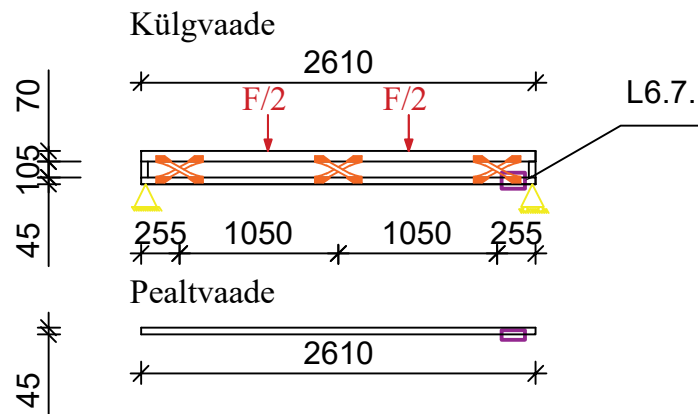
### Leppemärgid:

□ Purunemiskoht

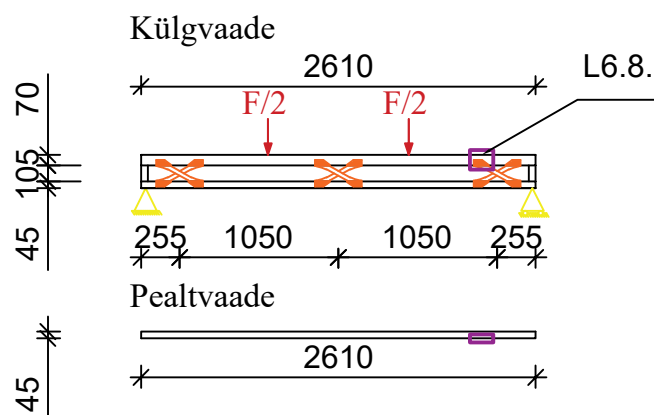
Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus:  <div>Magistritöö</div>	Projekti nr: M-1	
Objekti aadress:				Staadium:	
Joonestas:	Jakob Goroško		19.05.2017	Objekti nimetus:  Katsekehade joonised	osa:
Juhendas:	J. Valgur, V.Pallav				Alajaotus: Lisa
<div><div><div>Eesti Maaülikool</div><div>Estonian University of Life Sciences</div><div>Metsandus- ja maaehitusinstituut</div><div>Institute of Forestry and Rural Engineering</div></div><div><div>Maaehituse osakond</div><div>Department of Rural Building</div></div></div>				Möötkava: M 1:50	Joonise nimetus: Puit-metall sõrestikpostide purunemiskohad paindekatsel
			Lehti: 2	Leht: 1	
			Formaat: A4	Fail: Magistritöö.dwg	

## Lisa 5 järg

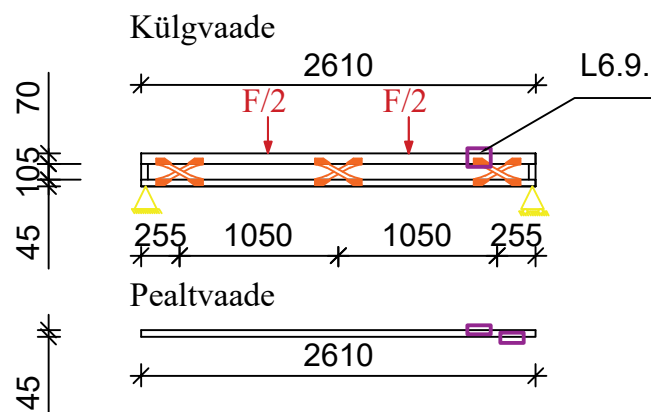
### Puit-metall sõrestiktala nr. 4



### Puit-metall sõrestiktala nr. 5



### Puit-metall sõrestiktala nr. 6



#### Märkused:

Antud töös viitab Joonis L6.X. lisa 6 oleva purunemispildi joonisele

#### Leppemärgid:

□ Purunemiskoht

Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus:  <div>Magistritöö</div>	Projekti nr: M-1	
Objekti aadress:				Staadium:	
Joonestas:	Jakob Goroško		19.05.2017	Objekti nimetus:  Katsekehade joonised	osa:
Juhendas:	J. Valgur, V.Pallav				Alajaotus: Lisa
<div><div><div>Eesti Maaülikool</div><div>Estonian University of Life Sciences</div><div>Metsandus- ja maaehitusinstituut</div><div>Institute of Forestry and Rural Engineering</div></div><div><div>Maaehituse osakond</div><div>Department of Rural Building</div></div></div>				Mõõtkava: M 1:50	Joonise nimetus:
			Lehti: 2	Leht: 2	Puit-metall
			Formaat: A4	Fail: Magistritöö.dwg	sõrestikpostide purunemiskohad paindekatsel



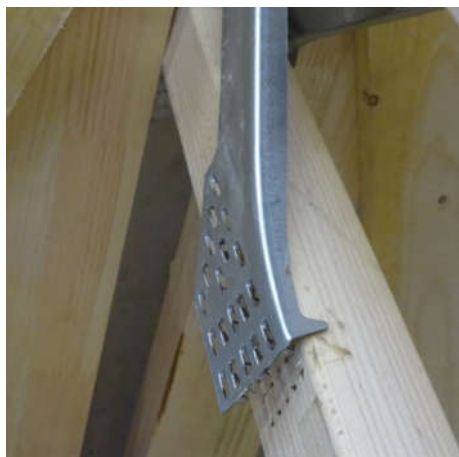
## Lisa 6. Puit-metallsõrestike purunemispildid



**Joonis L6.1.** Puit-metall sõrestikpost nr.1



**Joonis L6.2** Puit-metall sõrestikpost nr.1



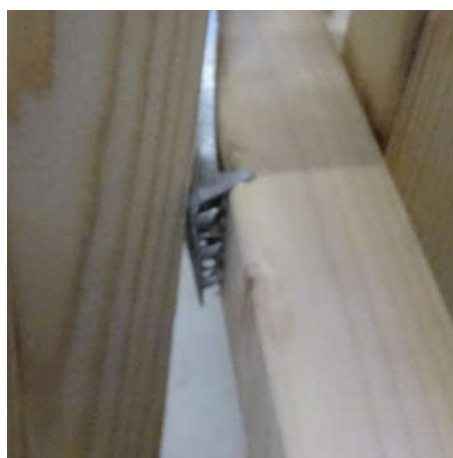
**Joonis L6.3.** Puit-metall sõrestikpost nr.2



**Joonis L6.4.** Puit-metall sõrestikpost nr.2



**Joonis L6.5.** Puit-metall sõrestikpost nr.3



**Joonis L6.6.** Puit-metall sõrestikpost nr.3

## Lisa 6. järg



**Joonis L6.7.** Puit-metall sõrestikpost nr.4



**Joonis L6.8.** Puit-metall sõrestikpost nr.5

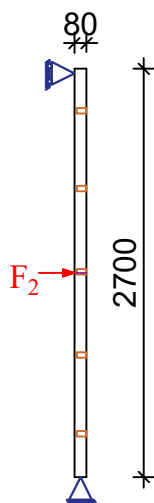


**Joonis L6.9.** Puit-metall sõrestikpost nr.6

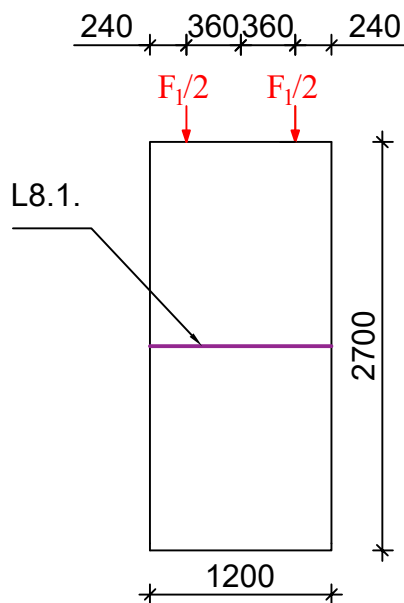
## Lisa 7. Puit-betoon komposiitpaneelide purunemiskohad

Betoonplaat nr. 1

KÜLGVAADE

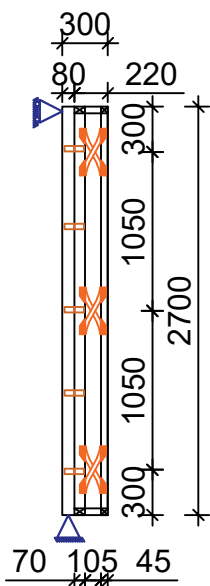


EESTVAADE

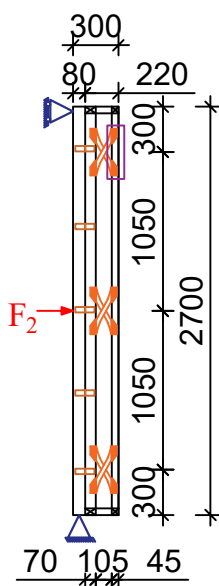


Komposiitpaneel nr. 2

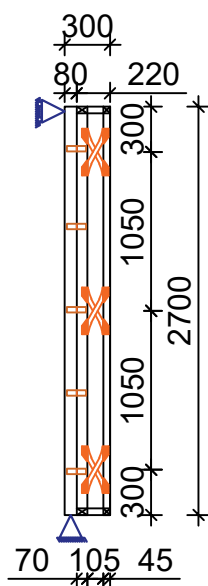
VASAKPOOLNE POST



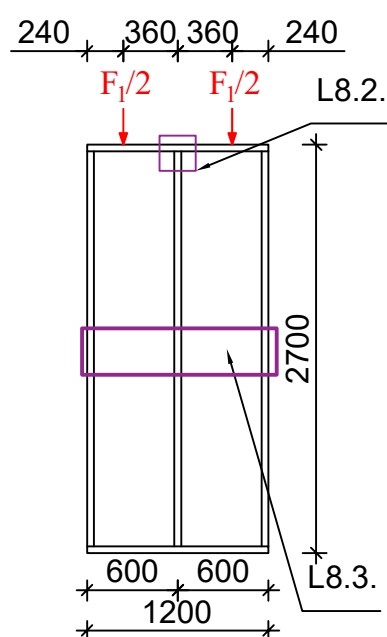
KESKMINE POST



PAREMPOOLNE POST



EESTVAADE



### Märkused:

Antud töös viitab L8.X. lisa 8 oleva purunemispildi joonisele

### Eksplikatsioon:

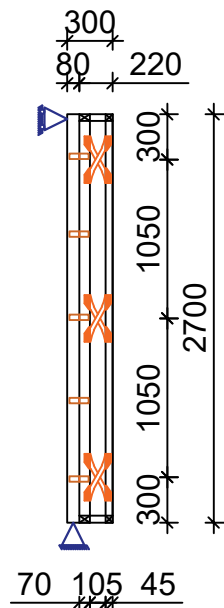
□ Purunemiskoht

Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus:  <div>Magistritöö</div>		Projekti nr: M-1	
Objekti aadress:					Staadium:	
Joonestas:	Jakob Goroško		19.05.2017	Objekti nimetus:		osa:
Juhendas:	J. Valgur, V.Pallav			Katsekehade joonised		Alajaotus: Lisa
<div><div><div>Eesti Maaülikool</div><div>Estonian University of Life Sciences</div><div>Metsandus- ja maaehitusinstituut</div><div>Institute of Forestry and Rural Engineering</div></div><div><div>Maaehituse osakond</div><div>Department of Rural Building</div></div></div>					Möötkava: M 1:50	Joonise nimetus:
				Lehti: 5	Leht: 1	Puit-betoon
				Formaat: A4	Fail: Magistritöö.dwg	komposiitpaneelide
						purunemiskohad.

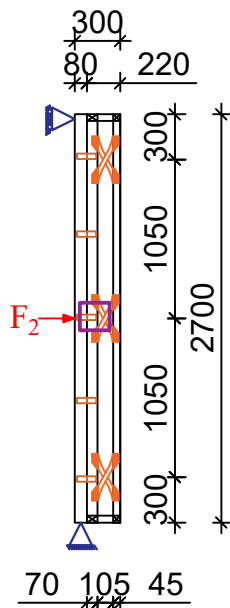
## Lisa 7 järg

### Komposiitpaneel nr. 3

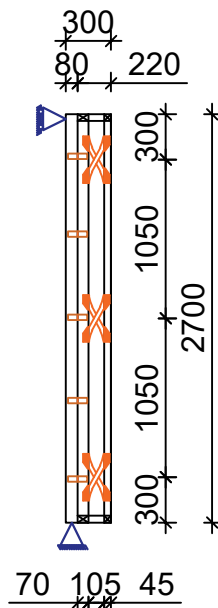
VASAKPOOLNE  
POST



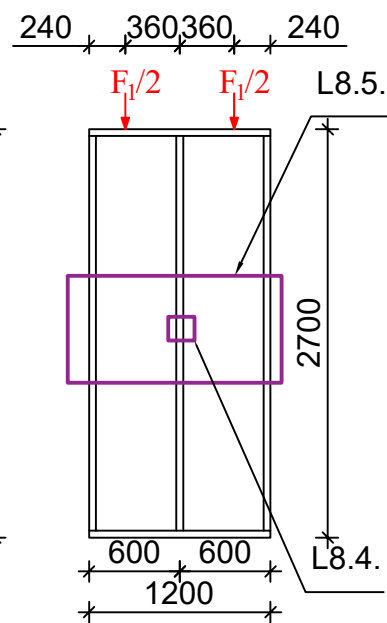
KESKMINE  
POST



PAREMPOOLNE  
POST

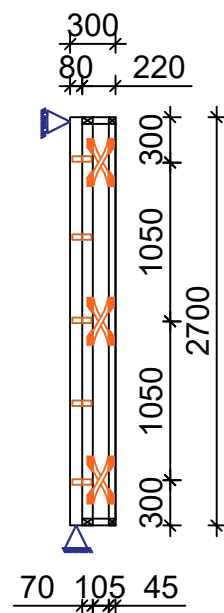


EESTVAADE

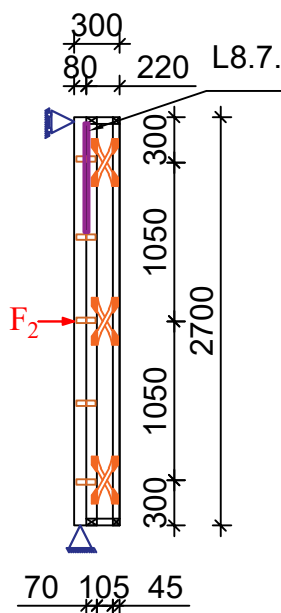


### Komposiitpaneel nr. 4

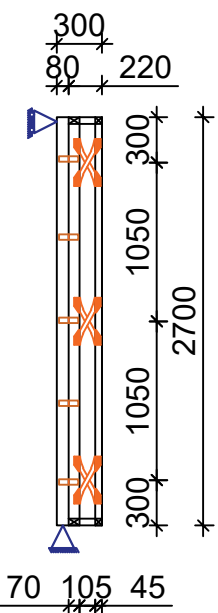
VASAKPOOLNE  
POST



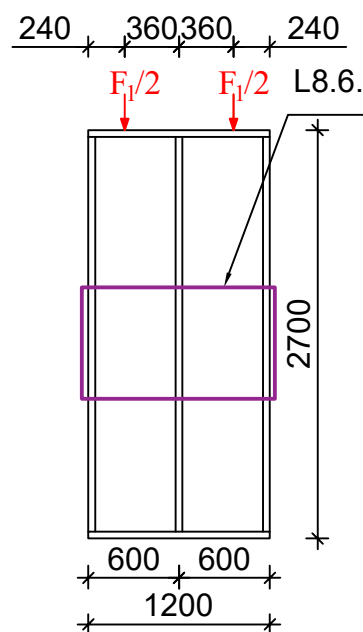
KESKMINE  
POST



PAREMPOOLNE  
POST



EESTVAADE



### Märkused:

Antud töös viitab L8.X. lisa 8 oleva purunemispidi joonisele

### Leppemärgid:

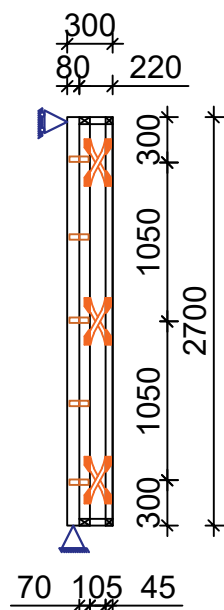
□ Purunemiskoht

Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus:  <div>Magistritöö</div>	Projekti nr: M-1	
Objekti aadress:				Staadium:	
Joonestas:	Jakob Goroško		19.05.2017	Objekti nimetus:  Katsekehade joonised	osa:
Juhendas:	J. Valgur, V.Pallav				Alajaotus: Lisa
<div><div><div>Eesti Maaülikool</div><div>Estonian University of Life Sciences</div><div>Metsandus- ja maaehitusinstituut</div><div>Institute of Forestry and Rural Engineering</div></div><div><div>Maaehituse osakond</div><div>Department of Rural Building</div></div></div>				Mõõtkava: M 1:50	Joonise nimetus: Puit-betoon komposiitpaneelide purunemiskohad.
			Lehti: 5	Leht: 2	
			Formaat: A4	Fail: Magistritöö.dwg	

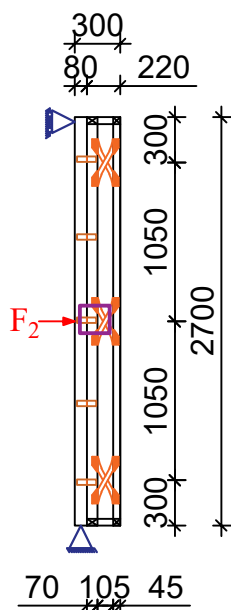
## Lisa 7 järg

### Komposiitpaneel nr. 5

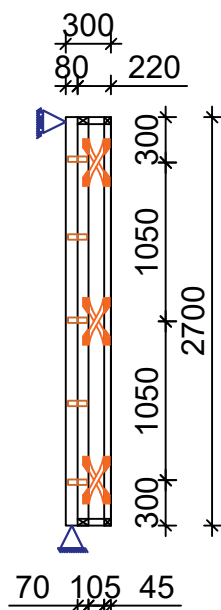
VASAKPOOLNE  
POST



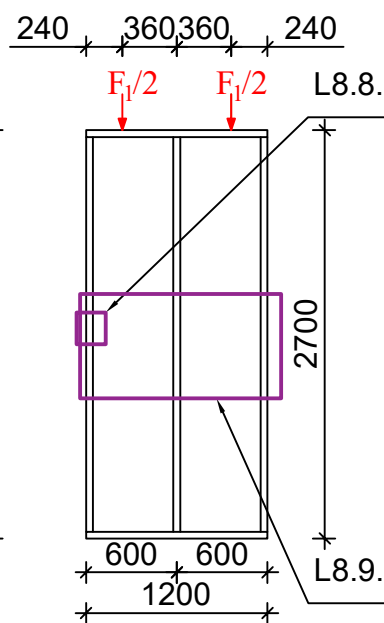
KESKMINE  
POST



PAREMPOOLNE  
POST

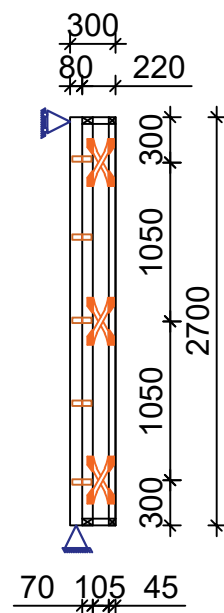


EESTVAADE

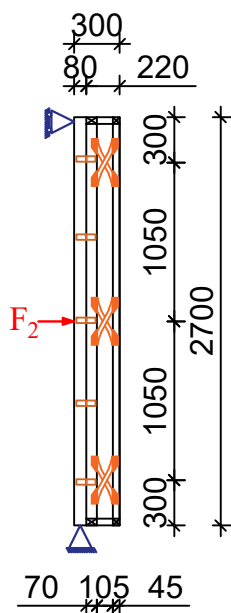


### Komposiitpaneel nr. 6

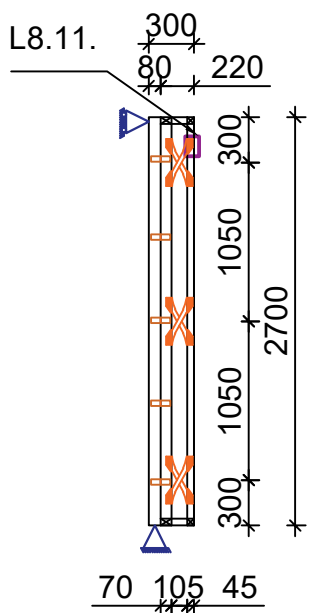
VASAKPOOLNE  
POST



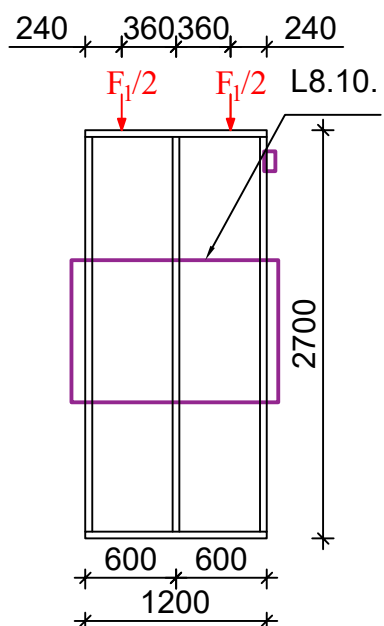
KESKMINE  
POST



PAREMPOOLNE  
POST



EESTVAADE



### Märkused:

Antud töös viitab L8.X. lisa 8 oleva purunemispildi joonisele

### Leppemärgid:

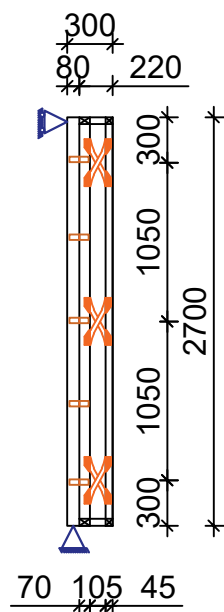
□ Purunemiskoht

Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus: <div>Magistritöö</div>		Projekti nr: M-1	
Objekti aadress:					Staadium:	
Joonestas:	Jakob Goroško		19.05.2017	Objekti nimetus: Katsekehade joonised		osa:
Juhendas:	J. Valgur, V.Pallav					Alajaotus: Lisa
<div><div><div>Eesti Maaülikool</div><div>Estonian University of Life Sciences</div><div>Metsandus- ja maaehitusinstituut</div><div>Institute of Forestry and Rural Engineering</div></div><div><div>Maaehituse osakond</div><div>Department of Rural Building</div></div></div>					Joonise nimetus: Puit-betoon komposiitpaneelide purunemiskohad.	
				Mõõtkava: M 1:50		
			Lehti: 5	Leht: 3		
			Formaat: A4	Fail: Magistritöö.dwg		

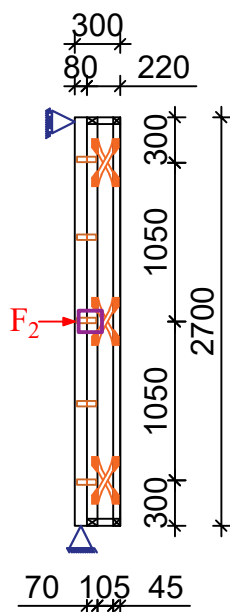
## Lisa 7 järg

### Komposiitpaneel nr. 7

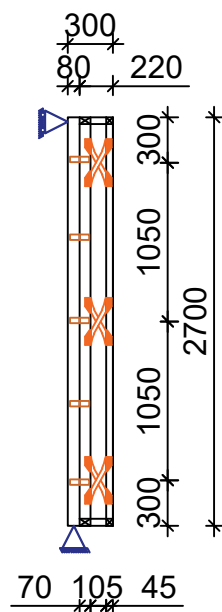
VASAKPOOLNE  
POST



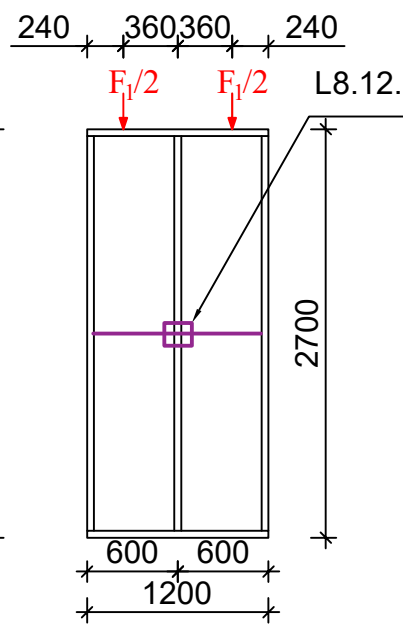
KESKMINE  
POST



PAREMPOOLNE  
POST

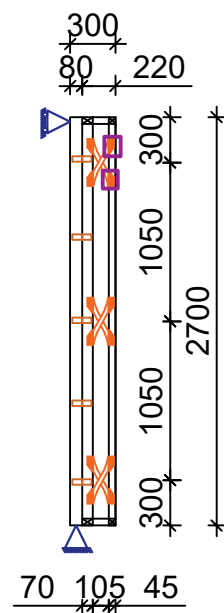


EESTVAADE

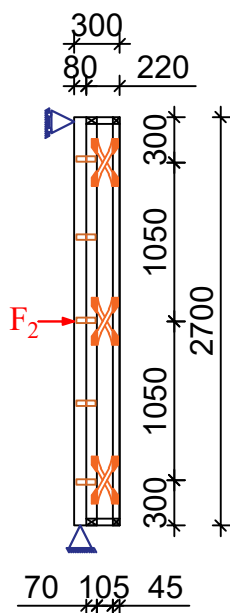


### Komposiitpaneel nr. 8

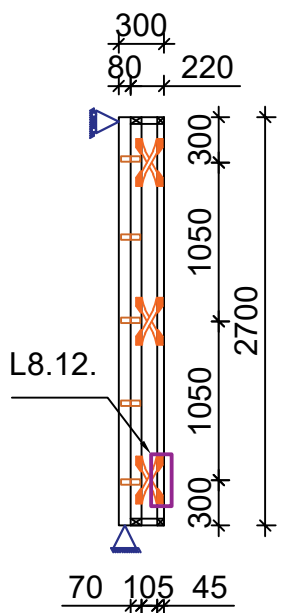
VASAKPOOLNE  
POST



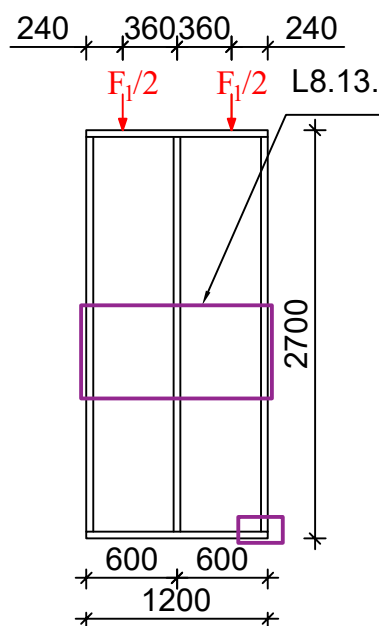
KESKMINE  
POST



PAREMPOOLNE  
POST



EESTVAADE



### Märkused:

Antud töös viitab L8.X. lisas 8 oleva purunemispildi joonisele

### Leppemärgid:

□ Purunemiskoht

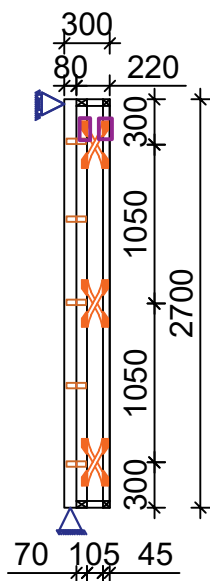
Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus: <div>Magistritöö</div>		Projekti nr: M-1	
Objekti aadress:					Staadium:	
Joonestas:	Jakob Goroško		19.05.2017	Objekti nimetus: Katsekehade joonised		osa:
Juhendas:	J. Valgur, V.Pallav					Alajaotus: Lisa
<div><div><div>Eesti Maaülikool</div><div>Estonian University of Life Sciences</div><div>Metsandus- ja maaehitusinstituut</div><div>Institute of Forestry and Rural Engineering</div></div><div><div>Maaehituse osakond</div><div>Department of Rural Building</div></div></div>					Joonise nimetus: Puit-betoon komposiitpaneelide purunemiskohad.	
			Mõõtkava: M 1:50			
			Lehti: 5	Leht: 4		
			Formaat: A4	Fail: Magistritöö.dwg		



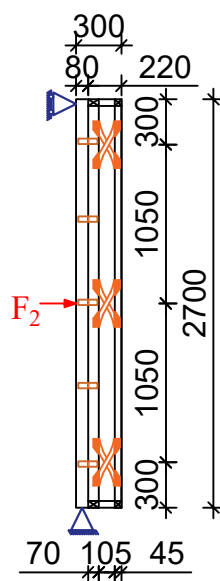
## Lisa 7 järg

### Komposiitpaneel nr. 9

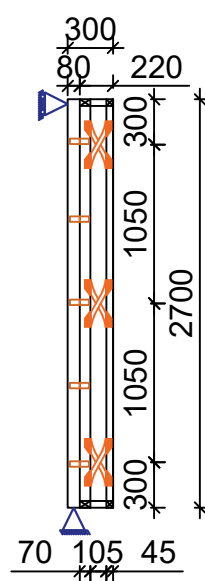
VASAKPOOLNE  
POST



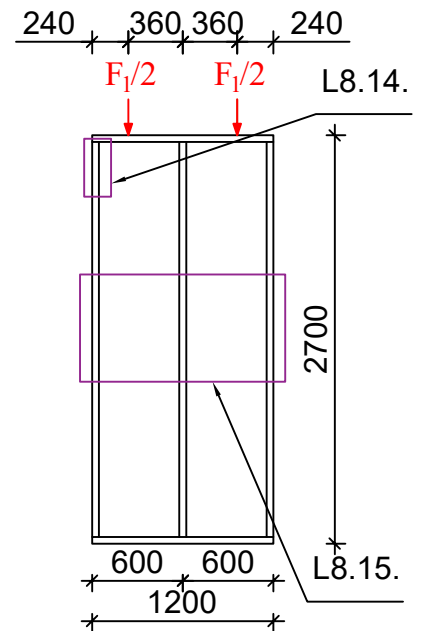
KESKMINE  
POST



PAREMPOOLNE  
POST



EESTVAADE



### Märkused:

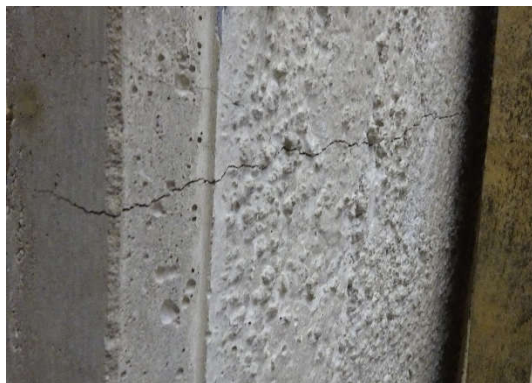
Antud töös viitab Joonis L8.X. lisa 8 oleva purunemispildi joonisele

### Leppemärgid:

□ Purunemiskoht

Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus: <div>Magistritöö</div>	Projekti nr: M-1		
Objekti aadress:				Staadium:		
Joonestas:	Jakob Goroško		19.05.2017	Objekti nimetus: Katsekehade joonised	osa:	
Juhendas:	J. Valgur, V.Pallav				Alajaotus: Lisa	
<div><div><div><div>Eesti Maaülikool</div><div>Estonian University of Life Sciences</div><div>EMU</div><div>Metsandus- ja maaehitusinstituut</div><div>Institute of Forestry and Rural Engineering</div></div><div><div>Maaehituse osakond</div><div>Department of Rural Building</div></div></div></div>					Mõõtka: M 1:50	Joonise nimetus: Puit-betoon komposiitpaneelide purunemiskohad.
				Lehti: 5	Leht: 5	
				Formaat: A4	Fail: Magistritöö.dwg	

## Lisa 8. Puit-betoon komposiitpaneelide purunemispildid



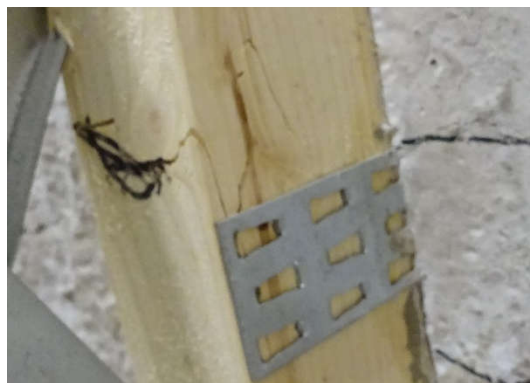
**Joonis L8.1.** Betoonelemendi nr. 1  
purunemispilt



**Joonis L8.2.** Puit-betoon komposiitpaneel  
nr. 2 purunemispilt



**Joonis L8.3.** Puit-betoon komposiitpaneel  
nr.2 purunemispilt



**Joonis L8.4.** Puit-betoon komposiitpaneel  
nr.3 purunemispilt



**Joonis L8.5.** Puit-betoon komposiitpaneel  
nr.3 purunemispilt



**Joonis L8.6.** Puit-betoon komposiitpaneel  
nr.4 purunemispilt



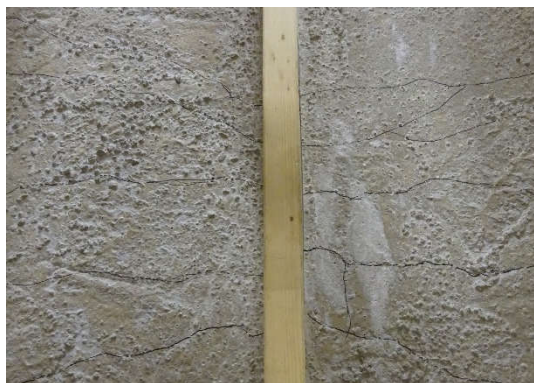
## Lisa 8 järg



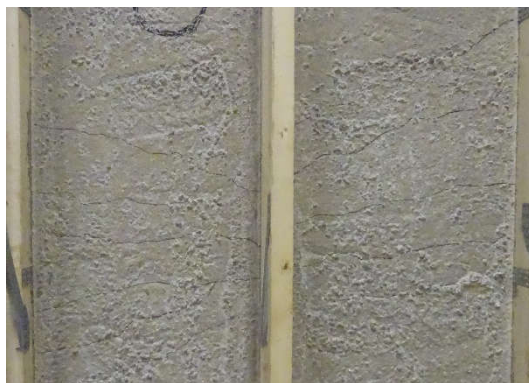
**Joonis L8.7.** Puit-betoon komposiitpaneel nr. 4 purunemispilt



**Joonis L8.8.** Puit-betoon komposiitpaneel nr.5 purunemispilt



**Joonis L8.9.** Puit-betoon komposiitpaneel nr. 5 purunemispilt



**Joonis L8.10.** Puit-betoon komposiitpaneel nr.6 purunemispilt



**Joonis L8.11.** Puit-betoon komposiitpaneel nr. 6 purunemispilt

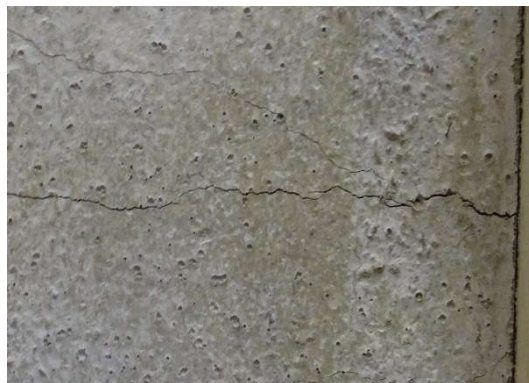


**Joonis L8.12.** Puit-betoon komposiitpaneel nr. 7 purunemispilt

## Lisa 8 järg



**Joonis L8.13.** Puit-betoon  
komposiitpaneel nr. 8 purunemispilt



**Joonis L8.14.** Puit-betoon  
komposiitpaneel nr. 8 purunemispilt

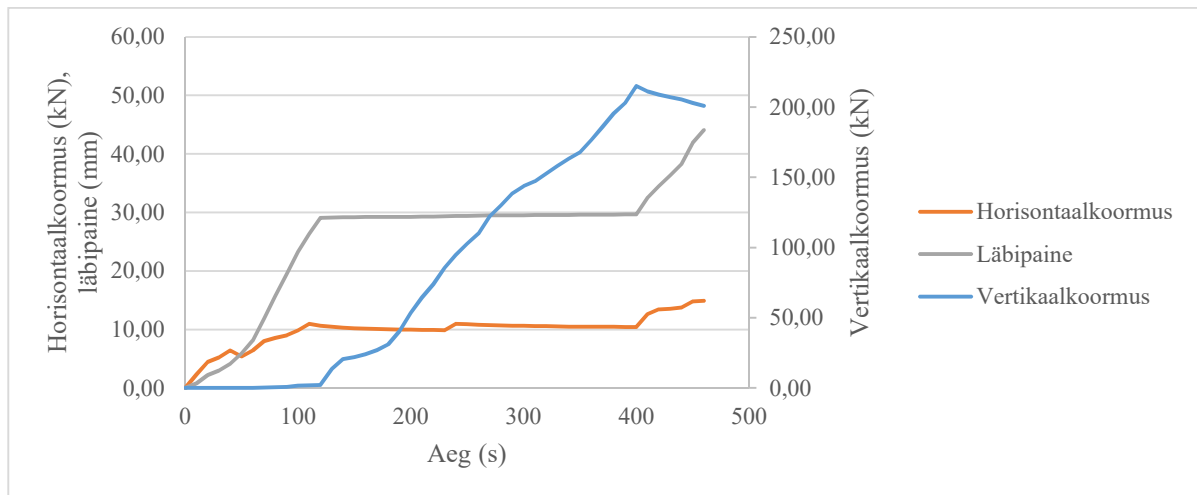


**Joonis L8.15.** Puit-betoon  
komposiitpaneel nr. 9 purunemispilt

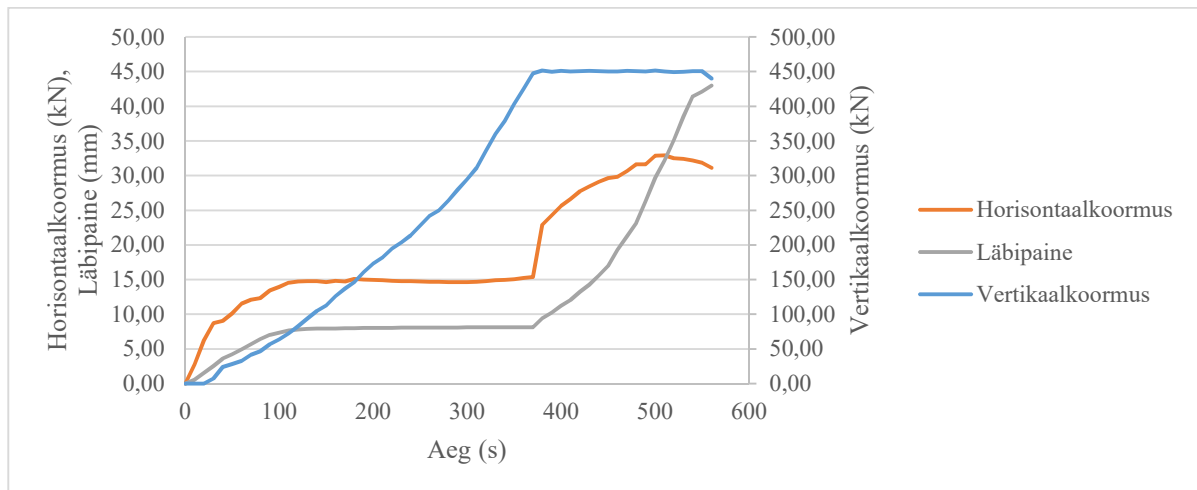


**Joonis 8.16.** Puit-betoon komposiitpaneel  
nr. 9 purunemispilt

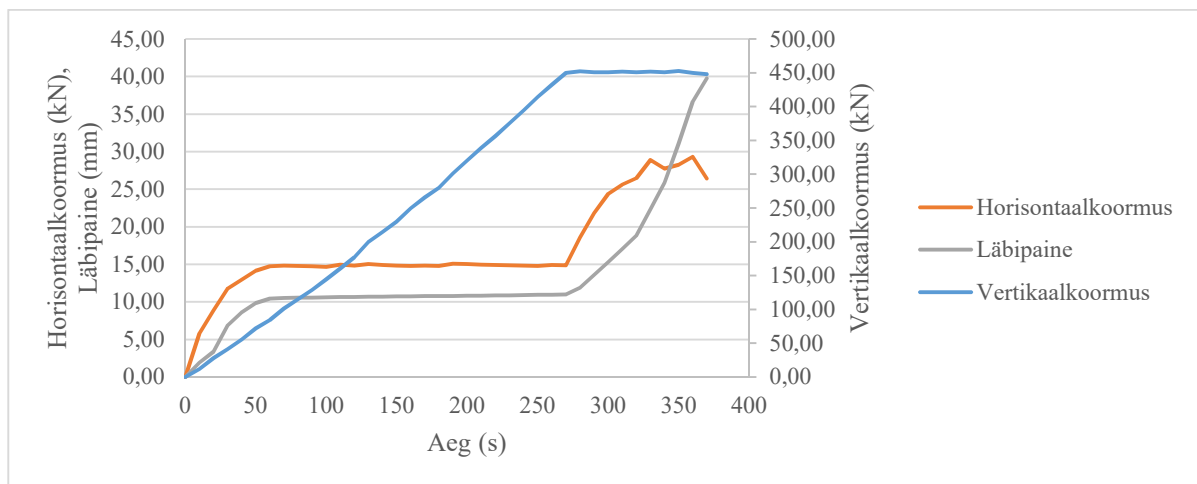
## Lisa 9. Katsekehade koormamine ja läbipaine ajas



**Joonis L9.1.** Paneeli nr. 1 koormus ja läbipaine ajas

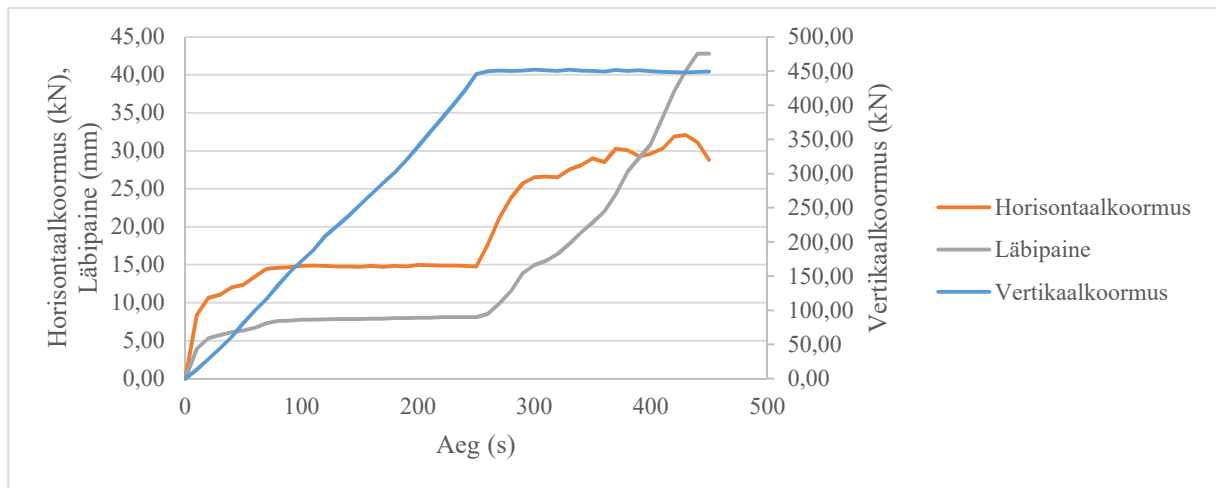


**Joonis L9.2.** Paneeli nr. 2 koormus ja läbipaine ajas

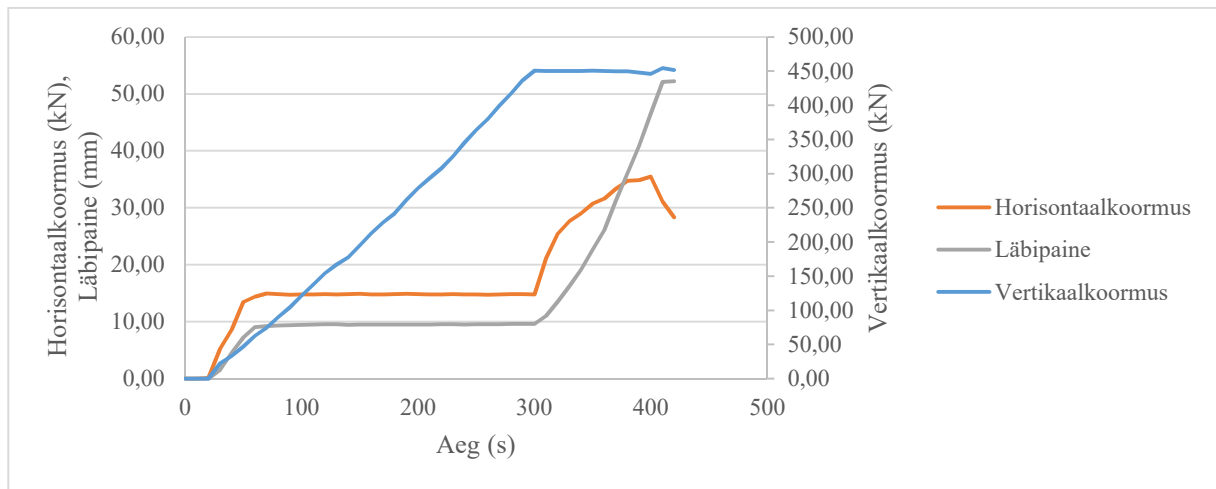


**Joonis L9.3.** Paneeli nr. 3 koormus ja läbipaine ajas

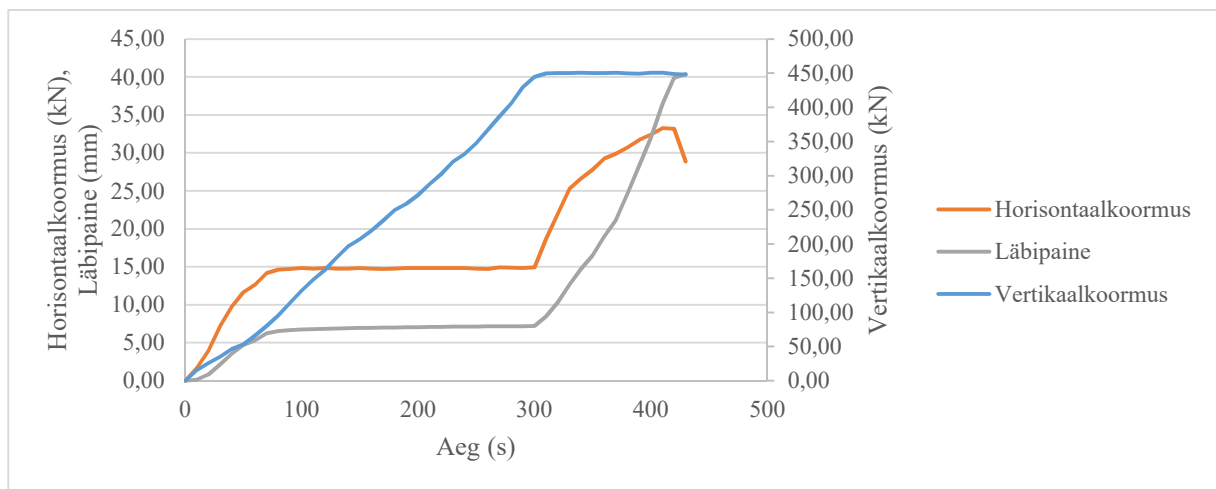
## Lisa 9 järg



**Joonis L9.4.** Paneeli nr. 4 koormus ja läbipaine ajas

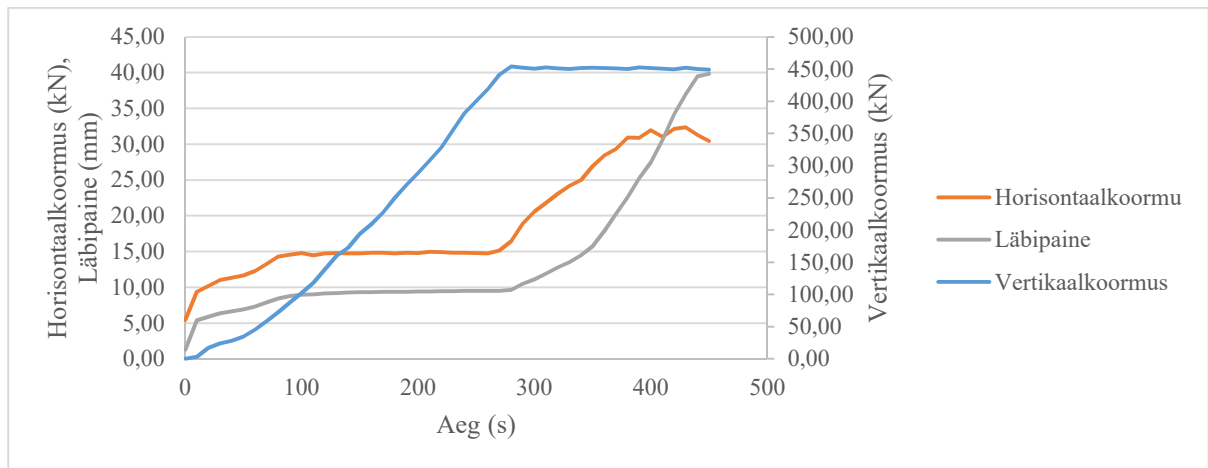


**Joonis L9.5.** Paneeli nr. 5 koormus ja läbipaine ajas

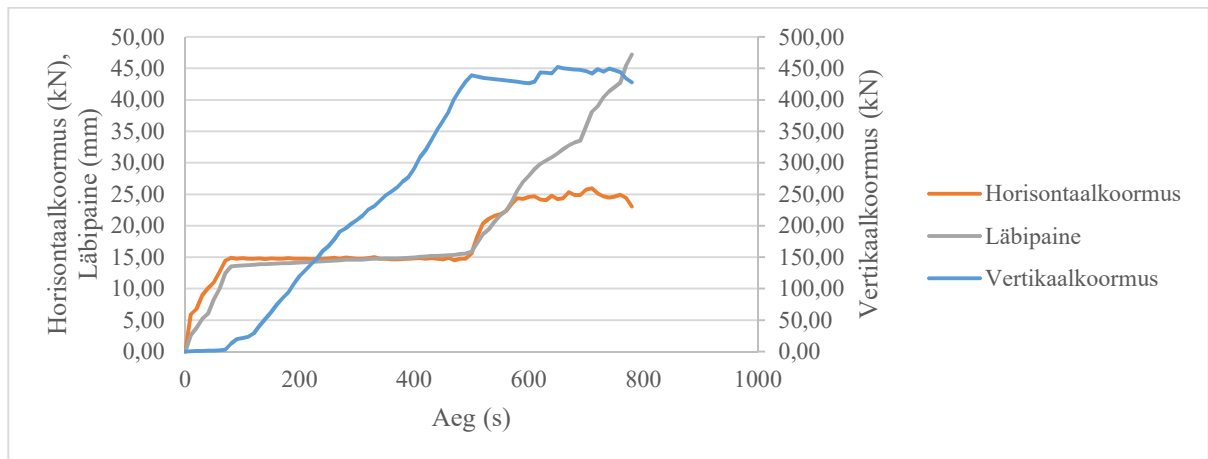


**Joonis L9.6.** Paneeli nr. 6 koormus ja läbipaine ajas

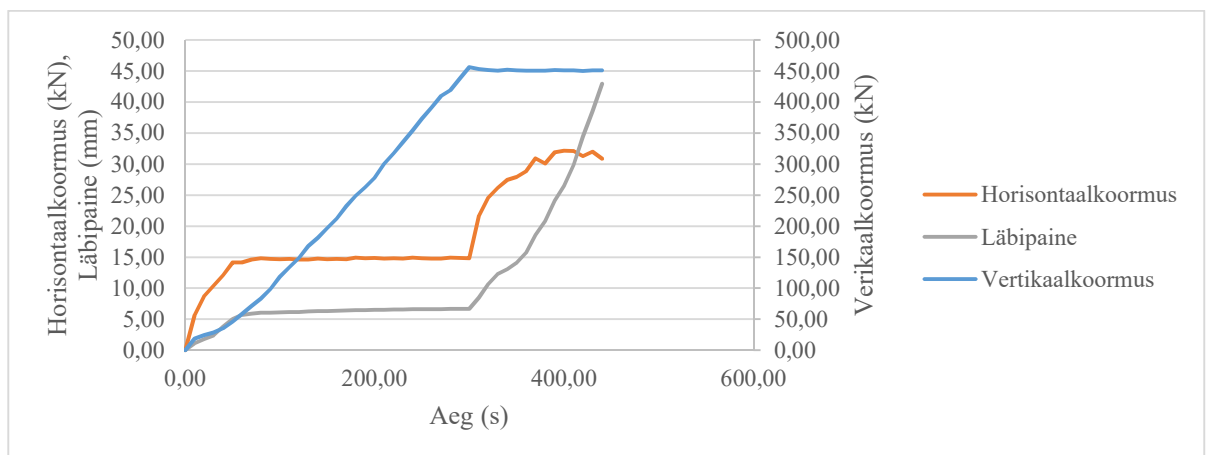
## Lisa 9 järg



**Joonis L9.7.** Paneeli nr. 7 koormus ja läbipaine ajas



**Joonis L9.8.** Paneeli nr. 8 koormus ja läbipaine ajas



**Joonis L9.9.** Paneeli nr. 9 koormus ja läbipaine ajas

## Lisa 10. Puit-metall sõrestikposti teoreetilise läbipainde arvutus

**Variant 1 (täisseinaline tala, arvestamata seina paindejäikust)**

**Andmed**

$$h_1 = 45 \text{ mm}$$

$$h_2 = 70 \text{ mm}$$

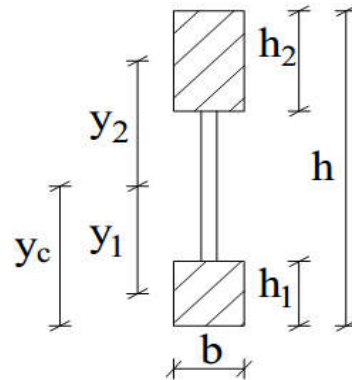
$$h = 220 \text{ mm}$$

$$b = 45 \text{ mm}$$

$$E = 11000 \text{ MPa}$$

$$P = 4 \text{ kN}$$

$$l = 2,55 \text{ m}$$



Ristlõikepindala

$$A = bh_1 + bh_2 = 45 \times 45 + 45 \times 70 = 5175 \text{ mm}^2$$

Ristlõike staatiline moment

$$S = bh_1 \times \frac{h_1}{2} + bh_2 \left( h - \frac{h_2}{2} \right) = 45 \times 45 \times \frac{45}{2} + 45 \times 70 \left( 220 - \frac{70}{2} \right) = 628312,5$$

$$y_c = \frac{S}{A} = \frac{628312,5}{5175} = 121,413 \text{ mm}$$

$$y_1 = y_c - \frac{h_1}{2} = 121,413 - \frac{45}{2} = 98,913 \text{ mm}$$

$$y_2 = h - y_c - \frac{h_2}{2} = 220 - 121,413 - \frac{70}{2} = 63,587 \text{ mm}$$

Tala ristlõike inertsmoment seotud vööde korral

$$I = \frac{bh_1^3}{12} + bh_1 \times y_1^2 + \frac{bh_2^3}{12} + bh_2 \times y_2^2 = \frac{45 \times 45^3}{12} + 45 \times 45 \times 98,913^2 + \frac{45 \times 70^3}{12} + 45 \times 70 \times 63,587^2 = 3417,7 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Tala läbipaine

$$\Delta = \frac{23}{648} \times \frac{Pl^3}{EI} = \frac{23}{648} \times \frac{4 \times 2,55^3 \times 10^3}{11 \times 10^6 \times 3417,7 \times 10^{-8}} = 6,26 \text{ mm}$$

## Lisa 10 järg

### Variant 2 (paindel eraldi töötavad vööd)

Tala arvutuslik paindejäikus eraldi töötavate (sidumata) vööde korral

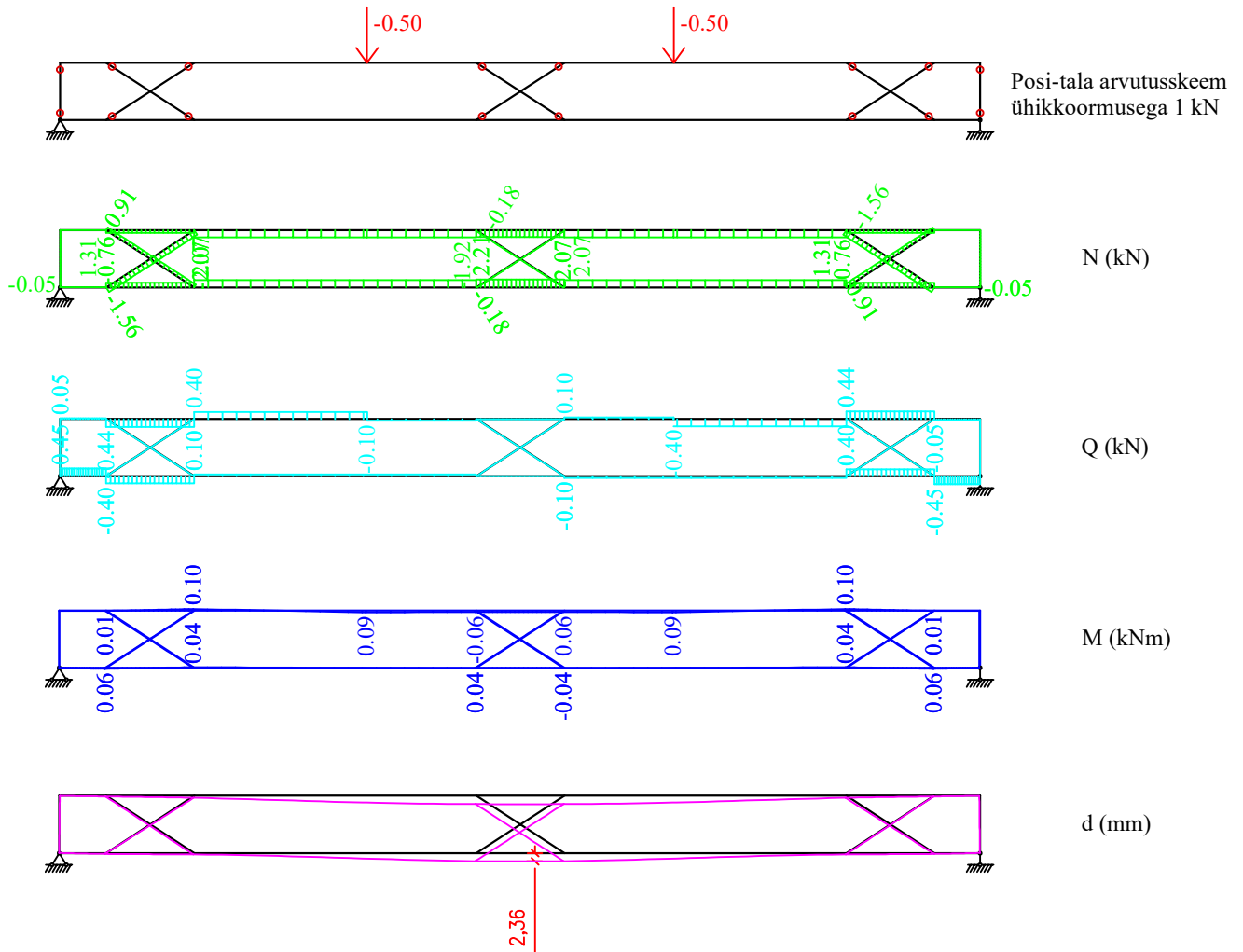
$$I = \frac{bh_1^3}{12} + \frac{bh_2^3}{12} = \frac{45 \times 45^3}{12} + \frac{45 \times 70^3}{12} = 162,80 \times 10^4 = 17908 \text{ mm}^4$$

Tala läbipaine

$$\Delta = \frac{23}{648} \times \frac{P \times l^3}{EI} = \frac{23}{648} \times \frac{4 \times 2,55^3 \times 10^3}{11 \times 10^6 \times 162,8 \times 10^{-8}} = 131,5 \text{ mm}$$

## Lisa 11. Taricad arvutuskeem ja epüürid Posi-talale

Posi-tala  
(diagonaalid liigendsõlmedega)

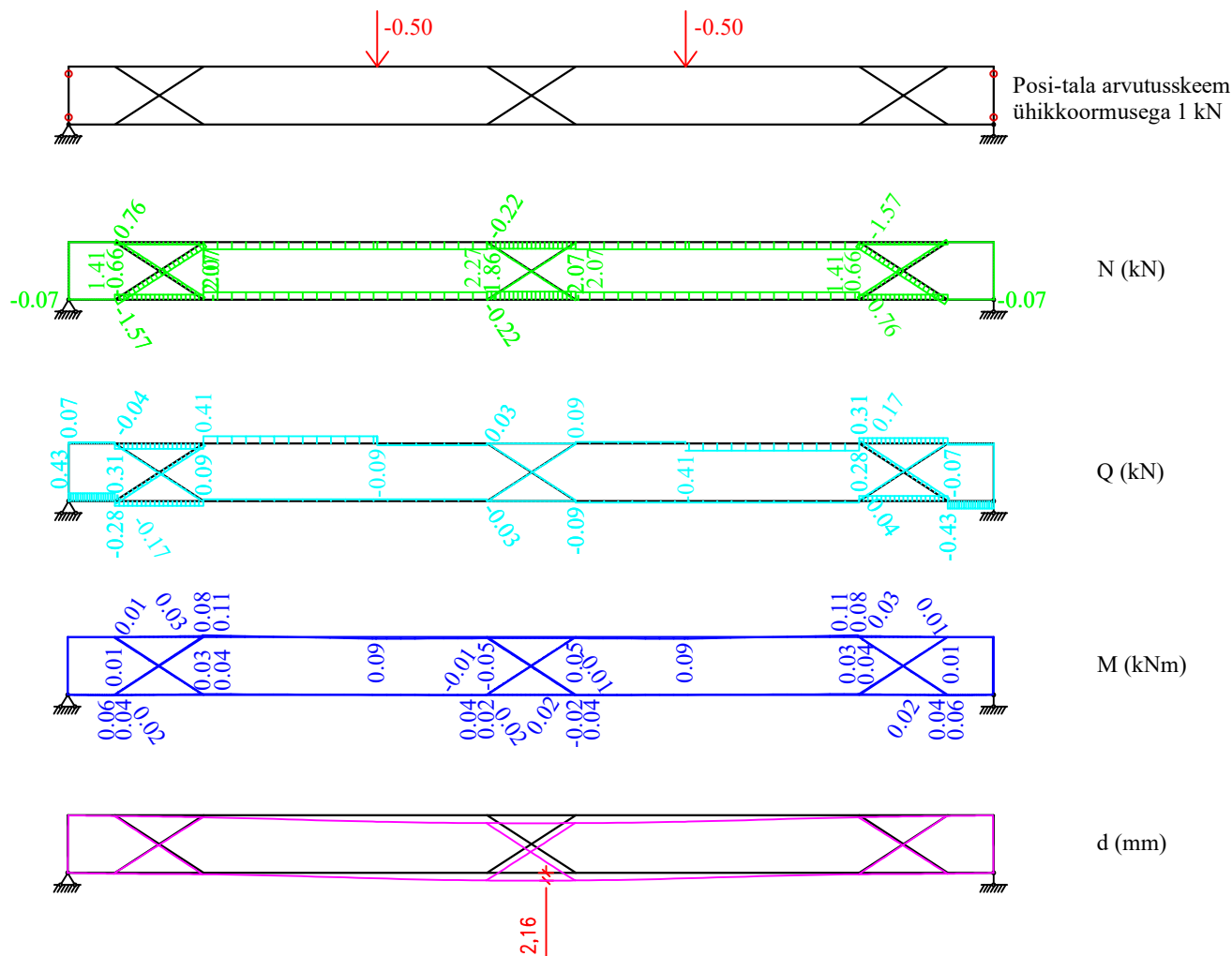


Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus:  <b>Magistritöö</b>		Projekti nr: <b>M-1</b>	
Objekti aadress:					Staadium:	
Joonestas:	Jakob Goroško		19.05.2017	Objekti nimetus: <b>Taricad arvutusskeemid ja epüürid</b>	osa:	
Juhendas:	J. Valgur, V.Pallav				Alajaotus: <b>Lisa</b>	
 <b>Eesti Maaülikool</b> Estonian University of Life Sciences  <b>Metsandus- ja maaehitusinstituut</b> Institute of Forestry and Rural Engineering						Joonise nimetus: <b>Posi sõrestikpostide purunemiskohad paindekatsel</b>
				Mõõtka: <b>M 1:20</b>		
				Lehti: <b>2</b>		
				Formaat: <b>A4</b>		
				Fail: <b>Magistritöö.dwg</b>		



# Lisa 11 järg

Posi-tala  
(diagonaalid jääkade sõlmedega)



Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus:  <b>Magistritöö</b>		Projekti nr: <b>M-1</b>		
Objekti aadress:					Staadium:		
Joonestas:	Jakob Goroško		19.05.2017	Objekti nimetus: <b>Taricad arvutuskeemid ja epüürid</b>		osa:	
Juhendas:	J. Valgur, V.Pallav					Alajaotus: <b>Lisa</b>	
 <b>Eesti Maaülikool</b> Estonian University of Life Sciences  <b>Metsandus- ja maaehitusinstituut</b> Institute of Forestry and Rural Engineering				Möötkava: <b>M 1:20</b>		Joonise nimetus:	
				Lehti: <b>2</b>		Leht: <b>2</b>	Posi sõrestikpostide
				Formaat: <b>A4</b>		Fail: <b>Magistritöö.dwg</b>	purunemiskohad
							paindekatsel
				Maaehituse osakond			
				Department of Rural Building			

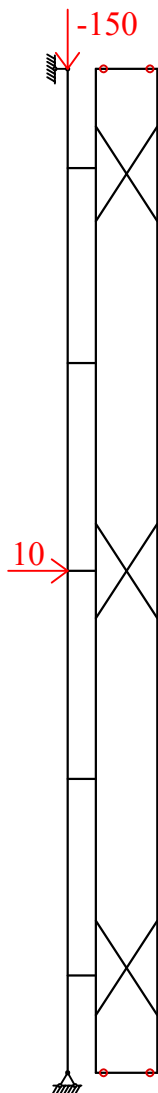
## Lisa 12. Taricad arvutuskeem ja epüürid puit-betoon komposiitpaneelile

Komposiitpaneel laiusga 400 mm

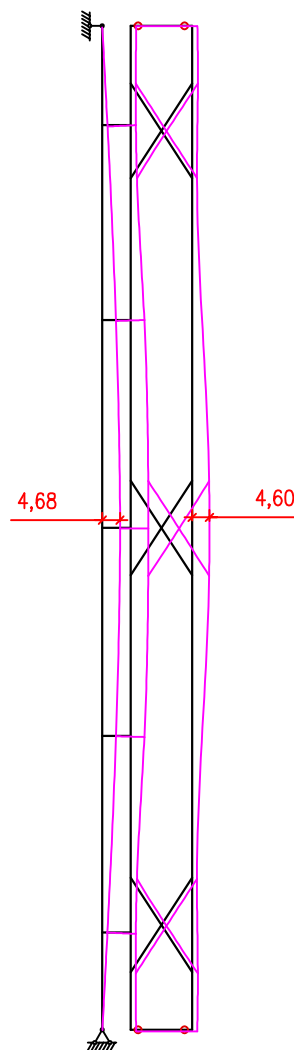
( $\frac{1}{3}$  paneeli laiust + 1 posi-tala jäikade sõlmedega)

Koormused kogu paneelile  $F_1 = 450 \text{ kN}$ ,  $F_2 = 30 \text{ kN}$

$\frac{1}{3}$  paneeli arvutusskeem

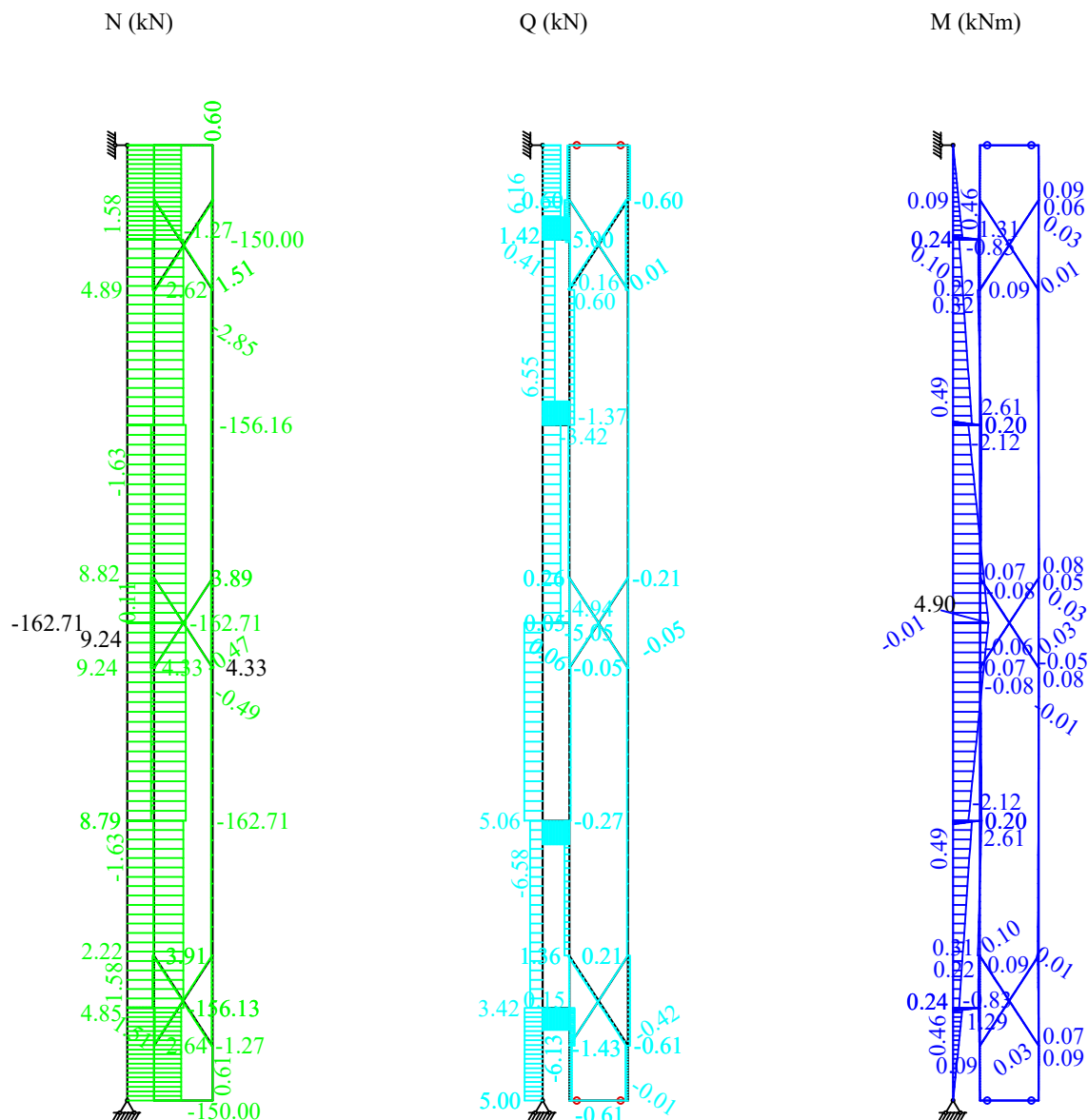


d (mm)



Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus:  <b>Magistritöö</b>		Projekti nr: <b>M-1</b>	
Objekti aadress:					Staadium:	
Joonestas:	Jakob Goroško		19.05.2017	Objekti nimetus: <b>Taricad arvutusskeem ja epüürid</b>		osa:
Juhendas:	J. Valgur, V.Pallav					Alajaotus: <b>Lisa</b>
 <b>Eesti Maaülikool</b> Estonian University of Life Sciences  <b>Metsandus- ja maaehitusinstituut</b> Institute of Forestry and Rural Engineering						Joonise nimetus:
						Posi sõrestikpostide
						purunemiskohad
						paindekatsel
				Möötkava: <b>M 1:20</b>		Joonise nimetus: <b>Posi sõrestikpostide purunemiskohad paindekatsel</b>
				Lehti: <b>2</b>	Leht: <b>1</b>	
				Formaat: <b>A4</b>	Fail: <b>Magistritöö.dwg</b>	
				Maaehituse osakond		Department of Rural Building

**Lisa 12 järg**



Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus:  <b>Magistritöö</b>		Projekti nr: <b>M-1</b>	
Objekti aadress:					Staadium:	
Joonestas:	Jakob Goroško		19.05.2017	Objekti nimetus: <b>Taricad arvutuskeem ja epüürid</b>		osa:
Juhendas:	J. Valgur, V.Pallav					Alajaotus: <b>Lisa</b>
 <b>Eesti Maaülikool</b> Estonian University of Life Sciences  <b>Metsandus- ja maaehitusinstituut</b> Institute of Forestry and Rural Engineering <b>Maaehituse osakond</b> Department of Rural Building					Mõõtkava: <b>M 1:20</b>	Joonise nimetus: <b>Posi sõrestikpostide purunemiskohad paindekatsel</b>
				Lehti: <b>2</b>	Leht: <b>2</b>	
				Formaat: <b>A4</b>	Fail: <b>Magistritöö.dwg</b>	

### Lisa 13. Komposiitpaneeli purustava põikkoormuse arvutamine

Teoreetiline komposiitpaneeli purustav arvutuslik ekvivalentne põikkoormus  $F_2$  vertikaalkoormuse  $F_1 = 450 \text{ kN}$  korral, lähtudes lõplike elementide meetodiga määratud sisejõududest.

Võttes aluseks sõrestiku sisejõud (lisa 11) arvutusest 1 kN suurusele koormusele ja katsest määratud purustava koormuse minimaalse väärtuse  $F = 5,59 \text{ kN}$ , saame sõrestiku kriitilisteks sisejõududeks:

$$\text{Tõmbevöö } 45 \times 45 \text{ mm } N_t = 5,59 \times 2,07 / 1,0 = 11,6 \text{ kN}$$

$$\text{Survevöö } 70 \times 45 \text{ mm } N_c = 5,59 \times (-2,07) / 1,0 = -11,6 \text{ kN}$$

$$\text{Diagonaalid } N_d = 5,59 \times (-1,57) / 1,0 = -8,77 \text{ kN}$$

Lähtudes 1/3 komposiitpaneeli (betoonosa laius 400 mm, 1 sõrestik) arvutustulemustest vertikaalkoormuse  $F_1 = 150 \text{ kN}$  ja keskpunktis rakendatud põikkoormuse  $F_2 = 10 \text{ kN}$  korral, saadakse sõrestiku kriitilisteks sisejõududeks:

$$\text{Tõmbevöö } 45 \times 45 \text{ mm } N_t = 4,33 \text{ kN}$$

$$\text{Survevöö } 70 \times 45 \text{ mm } N_c = -9,24 \text{ kN}$$

$$\text{Diagonaalid } N_d = -2,88 \text{ kN}$$

Kogu komposiitpaneeli (betoonosa laius 1200 mm, 3 sõrestikku) ekvivalentne põikkoormus, mis tekitab sõrestikus kriitilised jõud lähtudes ainult sõrestiku paindekatses on järgmised:

$$\text{Tõmbevöö } 45 \times 45 \text{ mm } F_{2c} = 11,6 \times 10 \times 3 / 4,33 = 80,3 \text{ kN}$$

$$\text{Survevöö } 70 \times 45 \text{ mm } F_{2c} = 11,6 \times 10 \times 3 / 9,24 = 37,6 \text{ kN}$$

$$\text{Diagonaalid } F_{2d} = 8,77 \times 10 \times 3 / 2,88 = 91,3 \text{ kN}$$

Määravaks saab minimaalne ekvivalentse põikkoormuse väärtus, mis lähtub puit-metallsõrestiku betoonplaadiga külgnevas puidust survevöös tekkivast sisejõust. Tegelikult saavad määravaks tõenäoliselt diagonaalide ja vööde vaheliste ogaplaatlidete purunemised.

Seega on vertikaalkoormuse  $F_1 = 450 \text{ kN}$  korral arvutuslik komposiitpaneeli purustav põikkoormus  $F_2 = 37,6 \text{ kN}$ .

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning  
juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Jakob Goroško,

sünniaeg 03.10.1992,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö  
Komposiitse puidust ja betoonist seinaelemendi „TimBet“ kandevõime katseline määramine,  
mille juhendajad on Jaak Valgur ja Vello Pallav

1.1 salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2 digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3 veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega  
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor:

\_\_\_\_\_  
(allkiri)

Tartu,

\_\_\_\_\_  
(Kuupäev)

---

**Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

Jaak Valgur

\_\_\_\_\_  
(Juhenda nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_  
(Kuupäev)

Vello Pallav

\_\_\_\_\_  
(Juhenda nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_  
(Kuupäev)